

**ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL MECANIZADO ELECTROEROSIVO EN LA  
PRODUCCIÓN Y DURACIÓN DE MOLDES PARA PLASTICO**

**EMERSON ORTEGA BUITRAGO**

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE OCCIDENTE**

**DIVISIÓN DE INGENIERIAS**

**PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA**

**SANTIAGO DE CALI**

**1999**

**ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL MECANIZADO ELECTROEROSIVO EN LA  
PRODUCCIÓN Y DURACIÓN DE MOLDES PARA PLASTICO**

**EMERSON ORTEGA BUITRAGO**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de  
Ingeniero Mecánico**

**Director  
OSCAR HERNÁNDEZ  
Ingeniero Metalúrgico**

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE OCCIDENTE**

**DIVISIÓN DE INGENIERIAS**

**PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA**

**SANTIAGO DE CALI**

**1999**

## NOTA DE ACEPTACIÓN

Trabajo de grado aprobado por el Director Asignado por la División,  
en el cumplimiento de los requisitos para otorgar el título  
de Ingeniero Mecánico.

Ing. Oscar Hernández  
\_\_\_\_\_  
Director

Ing. Julio Sinko  
\_\_\_\_\_  
Jurado

Ing. Héctor Jaramillo  
\_\_\_\_\_  
Jurado

Santiago de Cali, noviembre 17 de 1999

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. OBJETIVOS	2
1.1 OBJETIVO GENERAL	2
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	2
2. FUNDAMENTOS DE LA ELECTROEROSION	3
2.1 DEFINICION DE LA ELECTROEROSION	3
3. FUNDAMENTOS DE LA ELECTROEROSION	4
3.1 DEFINICION DEL MECANIZADO ELECTROEROSIVO	4
3.1.1 El mecanizado electroerosivo	4
3.2 PROPIEDADES FUNDAMENTALES	12
3.3 CONCEPTOS BASICOS	13
3.4 MATERIALES APTOS PARA LA ELECTROEROSION	21
3.5 TECNICA DE LA ELECTROEROSION	22
3.5.1 Desbaste	22
3.5.2 Semiacabado	23
3.5.3 Pulido	24

	pág.	
3.6	ESTADO DE SUPERFICIE	27
3.7	DIELECTRICOS	30
3.7.1	Tipos de dieléctricos	30
3.7.2	Propiedades de los aceites dieléctricos	31
3.8	METODOS DE LIMPIEZA DEL PROCESO	36
4.	HERRAMIENTAS UTILIZADAS EN LA ELECTROEROSION	40
4.1	MATERIALES	40
4.2	TIPOS DE FABRICACION	43
5.	PARAMETROS QUE INFLUYEN POSTERIOR AL MECANIZADO	45
5.1	DEFORMACIONES TERMICAS	45
6.	DESCRIPCION DE LAS MAQUINAS EROSIONADAS	49
6.1	COMPOSICIÓN MECANICA	49
6.2	COMPOSICION ELECTRICA	53
7.	CALCULOS Y FACTORES DE SELECCIÓN EN EL DISEÑO Y CONSTRUCCION DE MOLDES POR ELECTROEROSION	56
8.	PRUEBAS Y COMPORTAMIENTOS DEL ACERO P-20 EN LA DETERMNACION DE CAMBIOS ESTRUCTURALES	65
8.1	TRATAMIENTOS TERMICOS	65
8.2	PRUEBAS DE MECANIZADO	69
8.3	MEDICION DE RUGOSIDAD	69

	pág.
8.4 ANEXOS DE PRUEBAS	70
8.5 PRUEBAS DE MICRODUREZA	85
9. CONCLUSIONES	91
10. RECOMENDACIONES	93
BIBLIOGRAFIA	
ANEXOS	

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Esquema del mecanizado por erosión	5
Figura 2. Principio de la Mecanización	7
Figura 3. Comienzo de Arranque del material	7
Figura 4. Desprendimiento del material en el mecanizado	8
Figura 5. Incremento de temperatura en el material	9
Figura 6. Disipación de calor en el proceso de mecanizado	10
Figura 7. Polaridades Utilizadas	12
Figura 8. Formas de GAP	15
Figura 9. Representación del desgaste frontal	17
Figura 10. Esquema del desgaste lineal	17
Figura 11. Principales parámetros de las chispas	20
Figura 12. Desbaste	23
Figura 13. Semiacabado	23
Figura 14. Pulido	24
Figura 15. Sobredimensionamiento de un electrodo para desbaste	26
Figura 16. Estado de Superficie	28
Figura 17. Referencias de Acabado de Superficie	29

	pág.
Figura 18. Aspecto de Superficie	30
Figura 19. Limpieza por circulación del dieléctrico a través del electrodo.	36
Figura 20. Limpieza a través de la pieza de trabajo	37
Figura 21. Limpieza a través de la pieza de trabajo	37
Figura 22. Limpieza por succión del dieléctrico por medio del electrodo.	38
Figura 23. Sube el electrodo y entra dieléctrico limpio	39
Figura 24. Baja el electrodo desplazando dieléctrico contaminado	39
Figura 25. Mecanismo de movimiento de la pinola	50
Figura 26. Bloque distribuidor	51
Figura 27. Bloque Distribuidor	52
Figura 28. Grupo dieléctrico	52
Figura 29. Esquema de máquina de erosionar provista de condensador	54
Figura 30. Esquema de máquina de erosión por impulsos rectangulares	55
Figura 31. Diagrama de revenido	67
Figura 32. Tratamiento térmico de temple y revenido	68



## LISTA DE ANEXOS

- Anexo 1. Tabla Agie ejercicio pág. 57.
- Anexo 2-7. Tabla de mecanizados utilizados en pruebas.
- Anexo 8. Microfotografías de la zona donde se realizó las microdurezas.

## RESUMEN

El proyecto tiene por enfoque, Estudiar y Evaluar los diversos comportamientos que presente el acero AISI – SAE P-20 al emplearlo en la fabricación de moldes para plástico a través del proceso de Electroerosión por penetración.

El procedimiento con el cual se llevó a cabo la realización del proyecto está determinado por la siguiente secuencia:

- Identificación de las propiedades del material antes del mecanizado.
- Mecanizar el material en diversos rangos de la máquina electroerosionada.
- Realizar pruebas metalográficas y de dureza, llevando registros.
- Comparar y determinar los diversos cambios que tenga el material después del Mecanizado.

Para con lo anterior determinar rangos de mecanización con los que se logre un mejor aprovechamiento del material.

## INTRODUCCION

Actualmente la industria de la matricería tiene en la aplicación del mecanizado por electroerosión nuevas alternativas que permiten mejores niveles de calidad en la construcción de moldes y para los productos obtenidos en la transformación del plástico.

Es de especial interés dentro de la fabricación de los moldes: la selección del material, la forma de mecanización y tratamiento térmico al cual se someta. Por ello el presente estudio está enfocado a las propiedades que presente el acero P-20 frente al maquinado erosivo y la realización de pruebas, que permitan un mejor aprovechamiento del material dentro del proceso de elaboración de productos plásticos.

## 1. OBJETIVOS

### 1.1 OBJETIVO GENERAL

Estudiar el comportamiento general del acero P-20 utilizado en la electroerosión para identificar los factores que mejoren la calidad en el proceso de construcción de moldes por medio de esta técnica de mecanizado.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar cambios estructurales del acero P-20 utilizado en la mecanización por descarga eléctrica con el fin de prevenir fallas en los moldes fabricados.
- Destacar propiedades del acero P-20 y sus desventajas cuando ha sido sometido a este proceso de mecanizado, igual que para las herramientas utilizadas.
- Realizar un registro estadístico del comportamiento del material para identificar qué variables del proceso pueden disminuir las propiedades del material cuando se ha mecanizado por completo.

## 2. FUNDAMENTOS DE LA ELECTROEROSION

### 2.1 DEFINICION DE LA ELECTROEROSION

El maquinado por electroerosión es un proceso de trabajo utilizado en los metales, y en general, de los buenos conductores eléctricos. Se utiliza en este tipo de mecanizado las descargas eléctricas que serán las encargadas de provocar el movimiento de partículas en la superficie metálica de la pieza que constituye uno de los electrodos entre los cuales se presentará dicha descarga eléctrica.

El término de electroerosión se reserva particularmente en los sucesos de remoción de partículas de metales mediante la utilización de las descargas eléctricas, sin presentarse ningún tipo de acción mecánica.

### 3. FUNDAMENTOS DE LA ELECTROEROSION

#### 3.1 DEFINICION DEL MECANIZADO ELECTROEROSIVO

3.1.1 El mecanizado electroerosivo. La base del proceso electroerosivo por penetración se caracteriza por no ser compleja.

Antes de empezar el proceso, la herramienta de trabajo y la pieza a maquinar no permanecerá en contacto, quedando entre ellas una pequeña separación que será delimitada por un líquido aislante. Esto implicará dentro de la máquina un tanque donde se realizará la práctica del llenado, tanto la pieza como la herramienta se conectan en circuito con una fuente de alimentación de corriente continua donde estará presente un interruptor. La función principal será la de permitir la generación de un voltaje eléctrico. Cuando permanece en posición de cerrado se producirá una corriente eléctrica, pero no de forma inmediata por la participación en el evento del líquido dieléctrico. Solamente sucederá descarga cuando la separación entre electrodo y herramienta es muy pequeña. La corriente eléctrica se transforma en calor dentro de la zona de la descarga, produciendo así el calentamiento en la superficie del material. Al ser interrumpido

el paso de la corriente eléctrica, terminará el canal de la descarga en una forma rápida. Consecuente con ello sucederá la evaporación de la fusión metálica en la superficie de la pieza en forma de explosión, removiendo material hasta una determinada profundidad dependiendo de la magnitud que tenga la descarga eléctrica. Los desprendimientos de material crean en la superficie de la pieza pequeños cráteres y en la medida en que se presentan nuevas descargas se producirá más remoción del material, dando como resultado un desprendimiento constante de material en la superficie de la pieza que se mecaniza (Ver Figura 1).

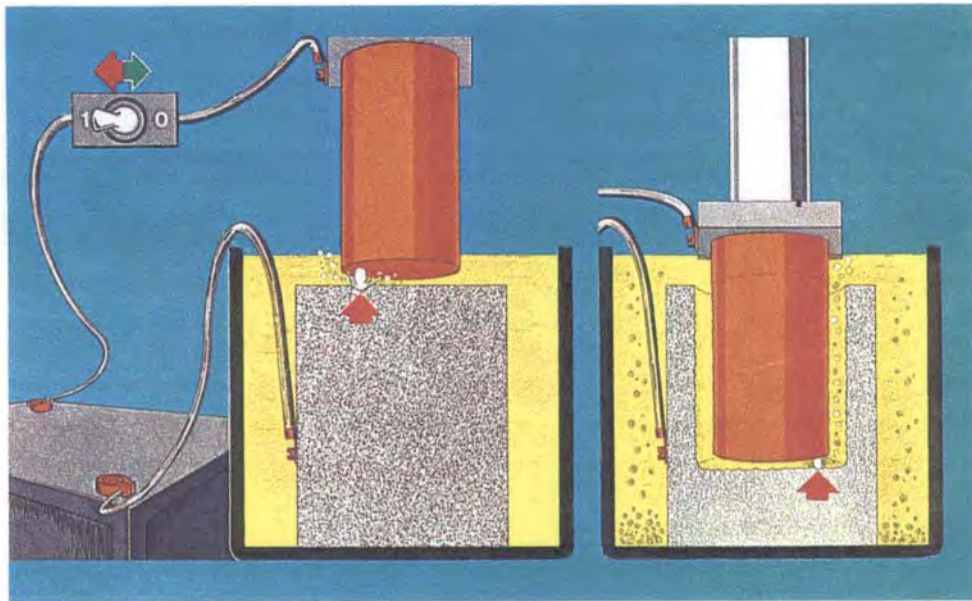


Figura 1. Esquema del mecanizado por erosión

Desde el comienzo en que se forma la tensión entre el electrodo y la pieza a trabajar y la consecuente descarga eléctrica, se tienen fases del proceso claras y establecidas en la siguiente figura.

Para la parte izquierda de la figura: la tensión conforma, alrededor del espacio donde se producirá la descarga, un campo eléctrico. Debido a este campo eléctrico y la geometría que se presenta entre el electrodo y la pieza, se establecerá en el líquido dieléctrico partículas conductoras contenidas en el lugar de mayor fuerza del campo. Ahora en el centro de la figura se establece un puente, en esos instantes ya el electrodo cargado negativamente lanzará partículas de carga negativa. Aquí se presenta un choque con las partículas de carga neutrales del espacio intermedio, lo que produce separación y formación de partículas de carga negativas y positivas. Esta fase se va ampliando en la zona intermedia y se denomina ionización por choque.

Para observar lo que sucede en el proceso nos ayudamos del siguiente esquema (Figura 3), en donde las partículas de cargas (+) se mueven hacia el electrodo de cargas (-) y de igual manera las cargas negativas hacia las positivas. La corriente eléctrica fluye aumentando hasta determinado valor, con esto se eleva la temperatura y se formará también la burbuja de vapor (lado derecho).



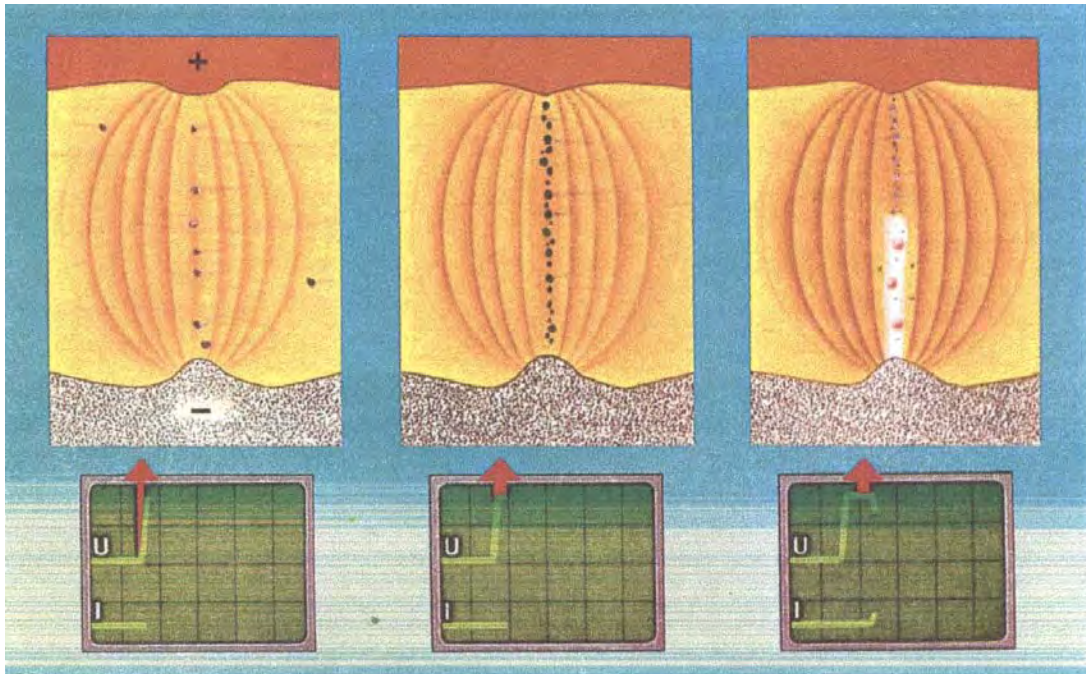


Figura 2. Principio de la Mecanización

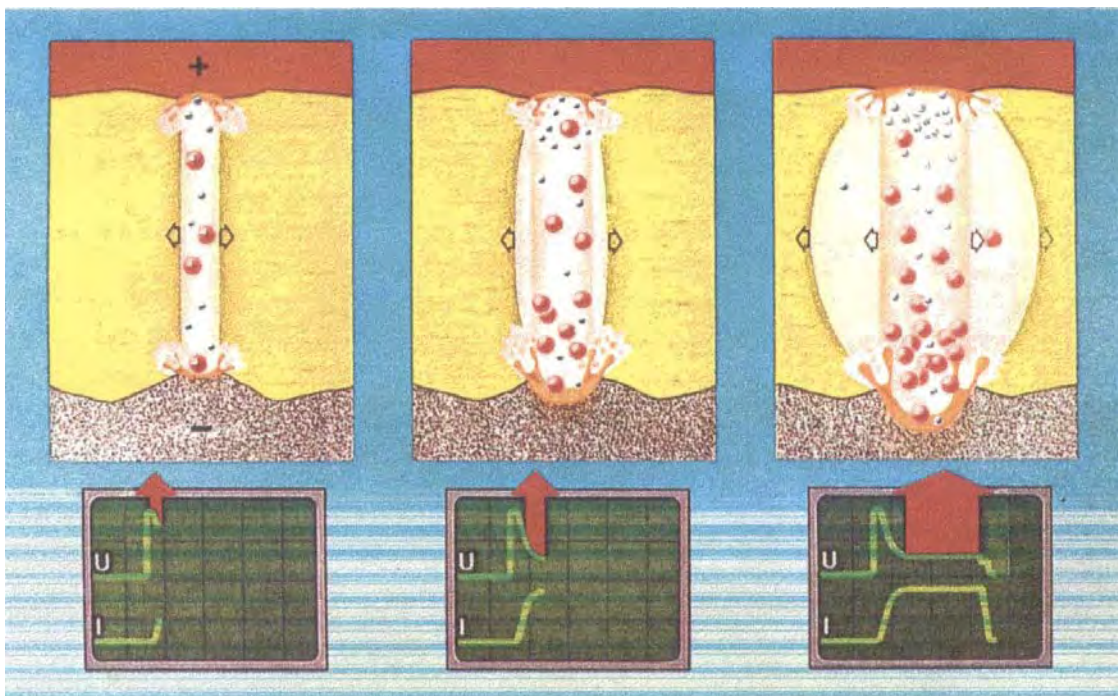


Figura 3. Comienzo de Arranque del material

La relación entre flujo de corriente y calor generado es directamente proporcional. Al presentarse una disminución rápida en la corriente, bajarán el número de partículas cargadas eléctricamente y consecuentemente la presión en la zona caerá. Sucediendo lo mismo con el canal que permite la descarga, de otra parte la fusión sobrecalentada de la superficie de la pieza se evapora en forma explosiva y arranca consigo material fundido.

La burbuja de vapor desaparecerá y dejará residuos en el dieléctrico de las partes metálicas arrancadas y productos desintegrados, la mayoría será carbón y gas (Ver Figura 4).

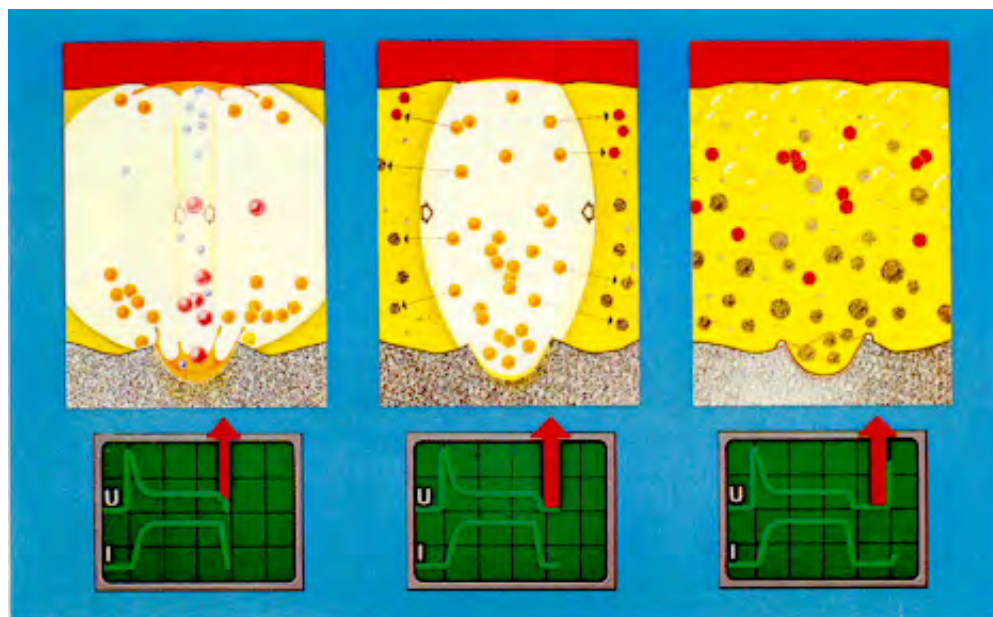


Figura 4. Desprendimiento del material en el mecanizado

Al momento de producirse la descarga eléctrica, sobre la superficie de la pieza empezarán a tocar partículas positivas (color rojo) que afectarán fuertemente las partículas metálicas, llevando con lo anterior al incremento de la temperatura. Cuando se alcanza la temperatura suficiente, comienza la remoción de partículas metálicas de la superficie (color amarillo – gris). Se produce además un acoplamiento entre partículas positivas y negativas (color rojo-azul) produciendo movimientos de tipo oscilante que traerá secundariamente el aumento en su temperatura de las partículas ahora no cargadas.

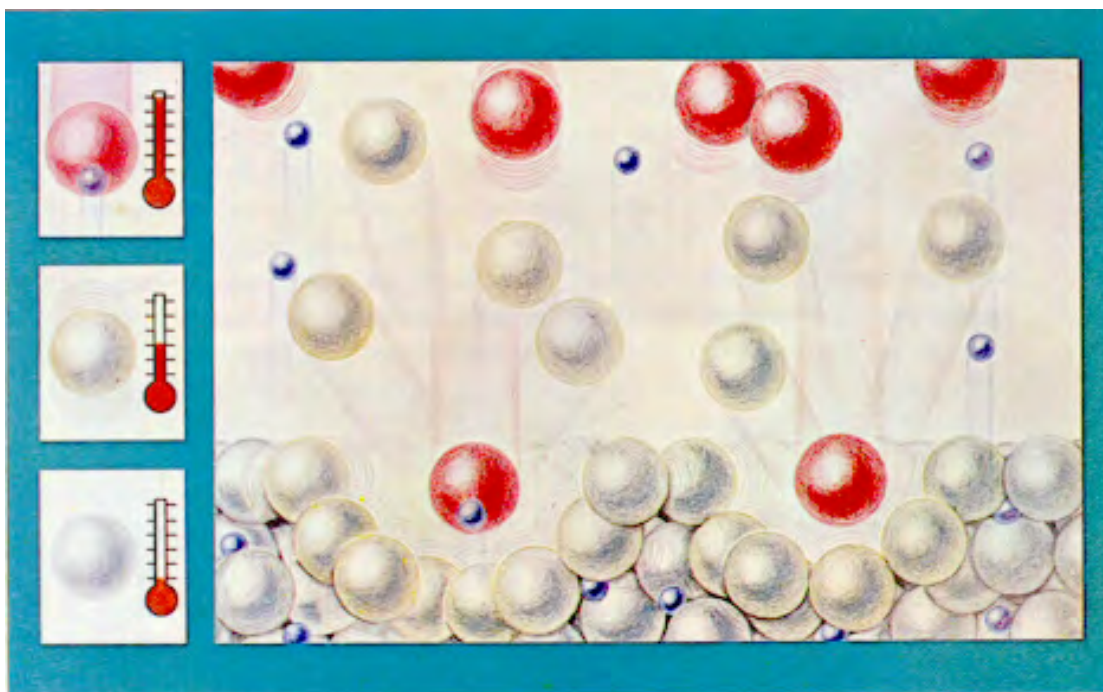


Figura 5. Incremento de temperatura en el material



Cuando se produce la descarga en consecuencia se presentará transformación en calor. El calor se encargará de sostener el canal de la descarga vertical, y por la acción de los electrodos se incrementará el valor en la temperatura del dieléctrico.

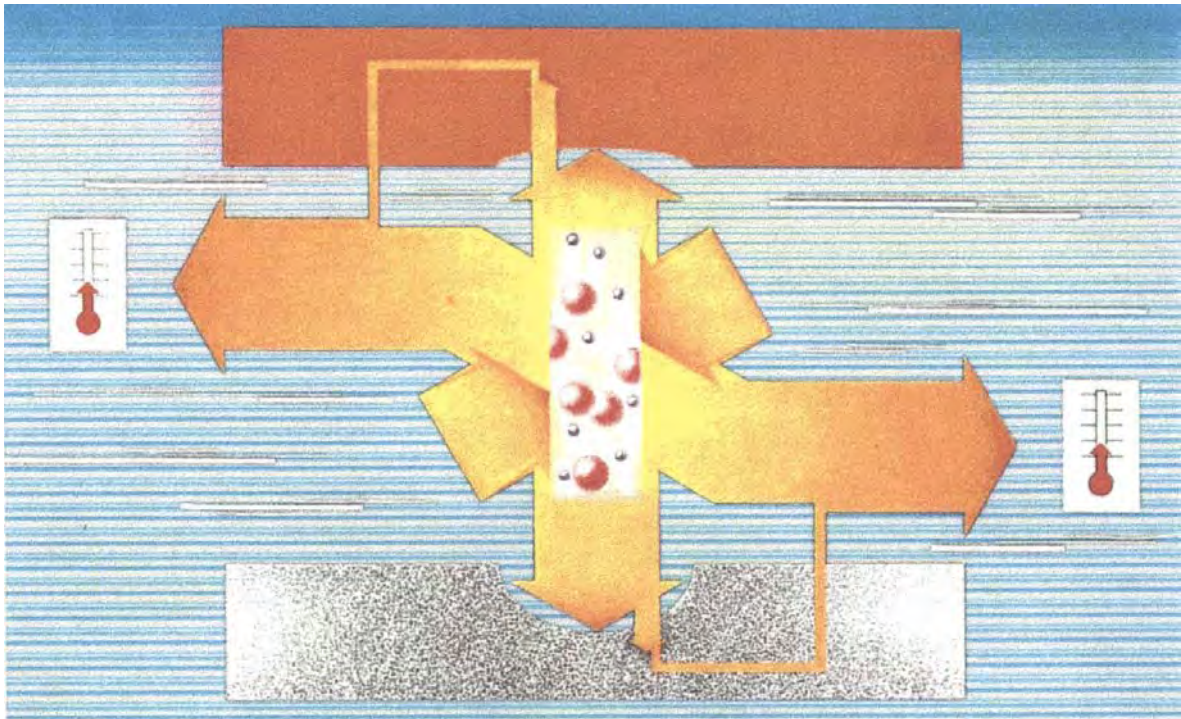


Figura 6. Disipación de calor en el proceso de mecanizado

Para tratar sobre la polaridad empleada. Cuando se lleva a cabo el intercambio de partículas cargada de forma negativa (azul) y positivamente (rojo) se formará dentro del canal de la descarga el flujo de corriente, resultado de lo anterior tendremos una

transformación en calor que provocará la remoción de material en la superficie de la pieza. Si se tiene una duración de impulsos muy corta, se presentará una movilización mayor de partículas con carga negativa que positiva. Para el electrodo receptor se producirá más llegada de calor, cuando hacia él se mueven más partículas de un solo tipo de carga.

Las partículas cargadas positivamente tienen mayor masa, producirá por ello más calor cuando aumenta su velocidad de choque.

Para lograr del proceso un desgaste menor del electrodo se escoge una polaridad en la cual se pueda transmitir mayor cantidad de calor hacia la pieza a mecanizar durante el tiempo que presentan las descargas.

Cuando el electrodo se conecta a negativa se trabaja con polaridad negativa y si es conectado a positivo se trabaja en polaridad positiva.

Es importante las características físicas de los materiales a trabajar y de los electrodos la definición del tipo de polaridad a utilizar en el proceso.

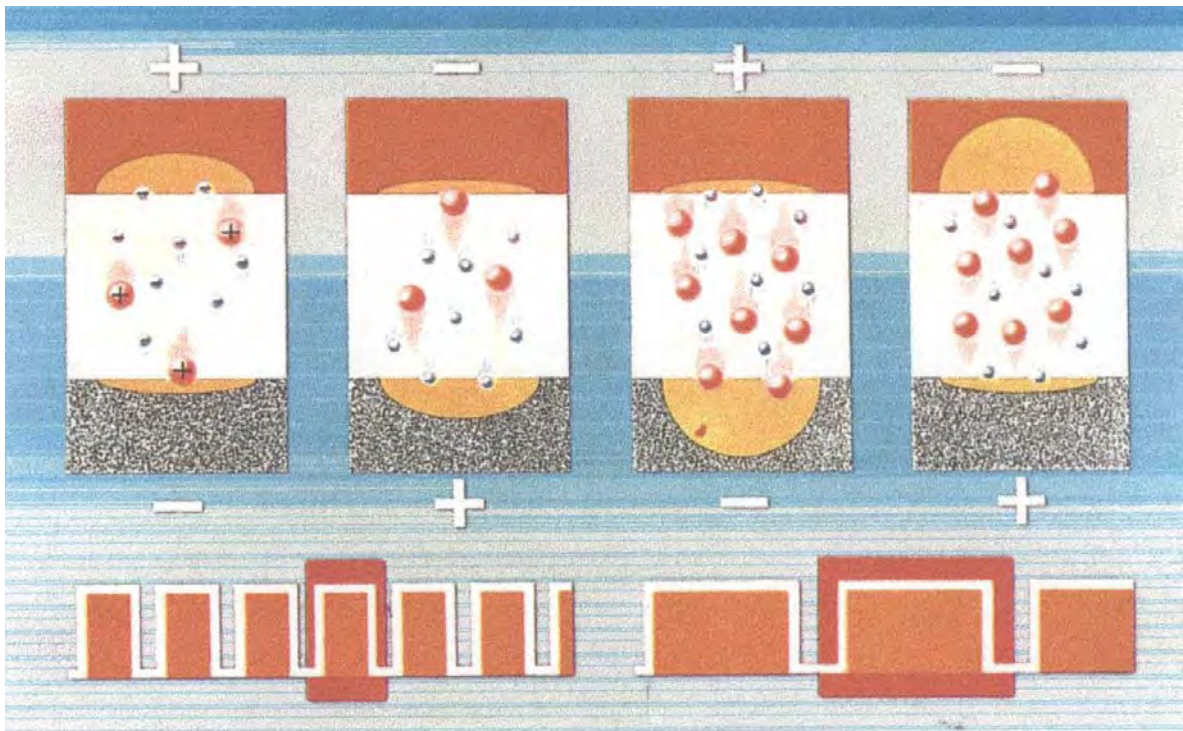


Figura 7. Polaridades Utilizadas

### 3.2 PROPIEDADES FUNDAMENTALES

Entre las características que brinda el mecanizado por penetración se tienen:

- a) El presentar ventajas para remoción de material muy duro como aceros endurecidos y metales duros.

- b) Se pueden generar formas internas en los materiales que son difíciles de lograr con otras máquinas herramientas, aún en piezas muy delicadas.
- c) Es demasiado lento para competir con el mecanizado convencional en piezas de formas simples, pero remueve material casi tan rápido, como el esmerilado con carburos cementados.
- d) Ofrece gran precisión en medidas y tolerancias para las piezas a mecanizar.
- e) Las herramientas empleadas en el proceso de electroerosionado presentan poco desgaste de acuerdo a los diversos parámetros de mecanizado de la máquina.

### 3.3 CONCEPTOS BASICOS

El fundamento principal de la Electroerosión es el efecto térmico ocasionado por la descarga eléctrica cuando salta la chispa entre el electrodo y la pieza a mecanizar Si entre el electrodo y la pieza solo existiera aire no se produciría electroerosión ya que al saltar la

chispa se ionizara el aire ramificando las descargas y calentando la pieza sin llegar a producirse desprendimiento en el material a trabajar.

Dentro de la tecnología sobre mecanizado por electroerosión tenemos las siguientes definiciones:

-GAP: Es la separación existente entre el electrodo y la pieza a mecanizar, de la cual se distinguen dos tipos:

El gap frontal se determina por regulación de la máquina y el Gap lateral es corregido y está en función de parámetros como la duración y la altura de los impulsos, el voltaje y otros factores predeterminados.

-Velocidad de Eliminación de las Partículas ( $V_w$ ): El movimiento que representa el dieléctrico es de gran importancia puesto que la estabilidad del proceso viene regido entre la producción de partículas arrancadas entre la zona de chispeo o Gap y la evacuación del material.



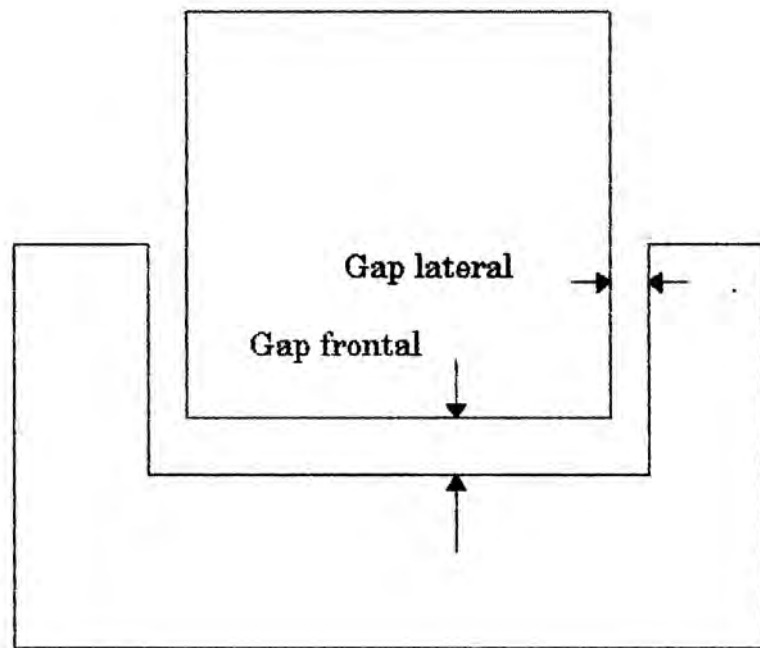


Figura 8. Formas de GAP

Cuando no se evacúa la materia arrancada, no se podrá eliminar de la pieza a trabajar ,Resultara conveniente asegurar la velocidad de eliminación constante del material ya que la energía que produce las chispas genera una cantidad de partículas desprendidas y su respectiva eliminación de la zona de descarga

$V_w$  = Volumen de materia eliminada / tiempo de mecanizado

-Desgaste de los electrodos: Dentro del desgaste de materia en el espacio pieza - electrodo también se produce eliminación de materia del electrodo que actúa como herramienta de mecanizado, dentro del desgaste encontramos los siguientes tipos:

El desgaste de volumen ( $V_v$ ) que caracteriza la disminución de longitud del electrodo durante el mecanizado por electroerosión.

$$(V_v) \% = \frac{\text{Volumen de materia arrancada del electrodo}}{\text{Volumen de materia arrancada en la pieza}}$$

El desgaste frontal ( $V_f$ ) que caracteriza la disminución de longitud del electrodo durante el mecanizado está determinado por la Expresión:

$$(V_f)\% = \frac{\Delta L}{H} \times 100$$

$H$  = Altura de la pieza

$\Delta L$  = Disminución Frontal

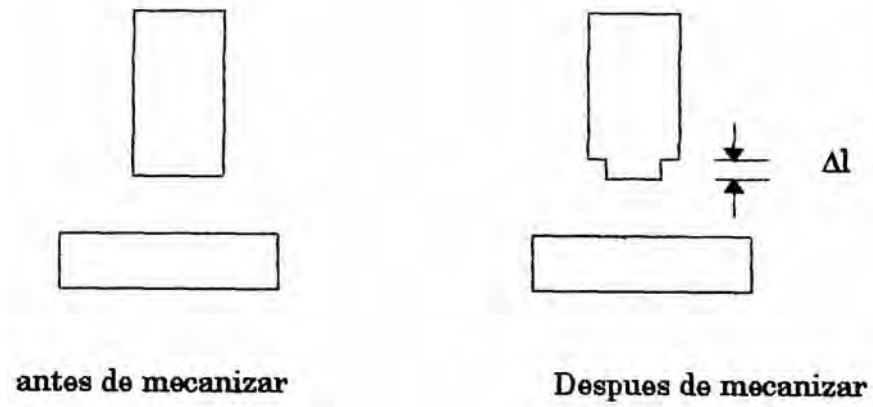


Figura 9. Representación del desgaste frontal.

El desgaste lineal caracteriza la parte lineal del electrodo, que representa conicidad:

$$VI (\%) = L'/H \times 100$$

$L'$  = Región de conicidad

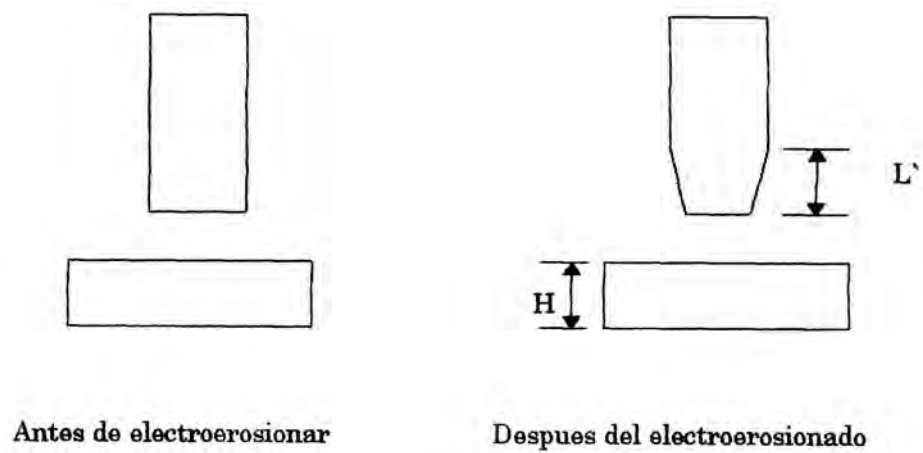


Figura 10. Esquema del desgaste lineal

La densidad de corriente se define como la relación activa correspondiente a la sección mecanizada frontalmente por el electrodo.

La velocidad de eliminación de materia de la pieza crece a medida que aumenta el valor de la intensidad media.

Una densidad de corriente muy elevada puede desgastar considerablemente los electrodos, sobre todo si son de cobre, aumentando el riesgo de formación de los arcos que originan cráteres. En la tabla 1 se han representado valores de desgaste de la pieza a mecanizar y del electrodo en función de la densidad de corriente, esto como compromiso para evitar un desgaste del electrodo a la vez que se logra un aceptable mecanizado de la pieza a electroerosionar.

Tabla 1. Valores de desgaste entre electrodos y piezas

MATERIAL		Densidad de corriente A/cm <sup>2</sup>
ELECTRODO	PIEZA	Superficie activa del electrodo < 15 cm <sup>2</sup>
Cobre +	Acero	8-15
Grafito +	Acero	8-12
Grafito -	Acero	6-8
Tungsteno cobre +	Acero	5-7
Tungsteno cobre -	Acero	15

-La fuerza electromotriz en vacío  $U_0$  es la amplitud del impulso de la tensión aplicada entre la pieza y el electrodo antes de que se produzca la descarga.

-La fuerza electromotriz de descarga ( $U_e$ ) es la fuerza electromotriz aplicada entre pieza y electrodo durante la descarga.

-La fuerza electromotriz de trabajo  $U$  es la media aritmética de las fuerzas electromotrices aplicadas entre el electrodo y pieza calculadas en un gran número de ciclos. En la práctica es el valor que indica el voltímetro de la máquina.

-Un ciclo completo dura un período ( $t_p$ ) y comprende el tiempo que dura un impulso ( $t_i$ ) o tiempo durante el cual se aplica una fuerza electromotriz entre la pieza y el electrodo, y el tiempo de reposo ( $t_o$ ) o tiempo de separación de dos impulsos. Entonces podemos decir que se cumple con la relación siguiente:

$$t_p = t_i + t_o$$

-La relación cíclica  $\tau$  es la relación entre la duración de impulso y del período.

$$\tau = t_i / t_p$$

-La amplitud máxima de corriente de descarga ( $I_e$ ) es el valor de la cresta de la corriente cuando ocurre la descarga.

-La corriente de trabajo ( $I$ ) es la media aritmética de la corriente correspondiente a un gran número de ciclos. Prácticamente es el valor indicado por el amperímetro de la máquina.

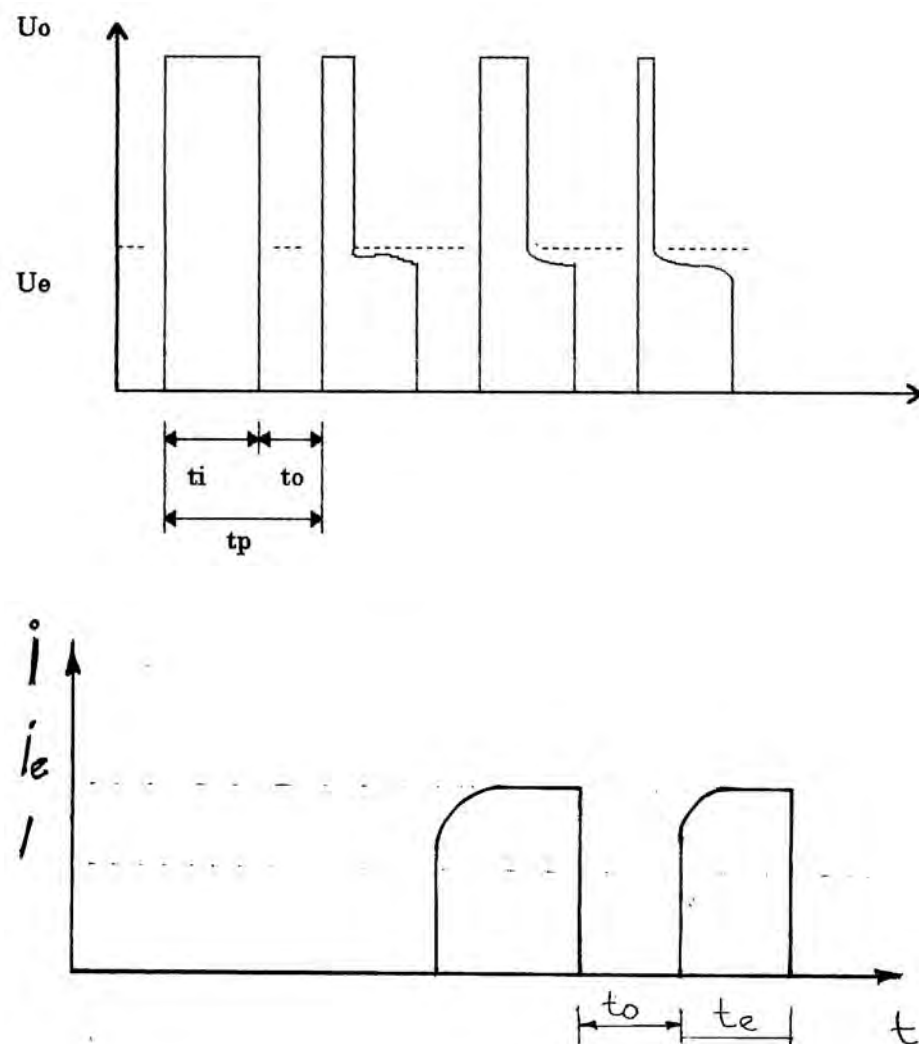


Figura 11. Principales parámetros de las chispas.

### 3.4 MATERIALES APTOS PARA LA ELECTROEROSION

En general; los metales y sus aleaciones, incluyendo el acero, aluminio, magnesio, zinc, hierro fundido, titanio, cobre y níquel, generalmente tienen como característica una buena conductividad eléctrica, lo cual facilita las condiciones para llevar a cabo un mecanizado por descargas eléctricas. Sin importar cual sea el proceso de fabricación: fundición , laminado, forja, etc.

Por lo consignado anteriormente es necesario controlar la potencia eléctrica utilizada en el mecanizado, ya que variará entre materiales la cohesión molecular.

Para aceros que han sido sometidos a tratamiento térmico se podrá dar lugar, durante el mecanizado erosivo, a la aparición de poros y grietas cuando el temple se ha efectuado en forma muy rápida, ya que las tensiones internas por el tratamiento se liberan por ruptura de las uniones entre las fibras de la pieza metálica bajo el efecto de la electroerosión.

Es muy recomendable para este tipo de mecanizado que las piezas tengan un óptimo tratamiento térmico, para evitar problemas superficiales que en la parte de moldes plásticos son altamente perjudiciales.

### 3.5 TECNICA DE LA ELECTROEROSION

Es el proceso de mecanizado erosivo con el fin de lograr las características deseadas en la superficie del material, se aplican tres tipos de mecanización de las siguientes características: desbaste, semiacabado y pulido.

3.5.1 Desbaste. Para esta forma de maquinado se presenta excesivo desprendimiento de material de la pieza en poco tiempo, destacándose por lo anterior un gran número de descargas presentadas de alto nivel de energía. En consecuencia, la medida en la rugosidad será elevada y el desgaste considerado en el electrodo herramienta.

La siguiente figura nos brindará una idea del estado final de superficie obtenido mediante un desbaste.



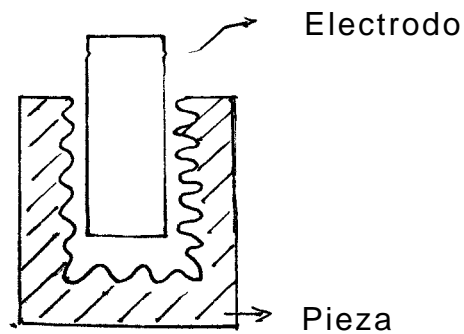


Figura 12. Desbaste

3.5.2 Semiacabado. En este rango de mecanización, los niveles de potencia eléctrica disminuyen, con lo cual se producirá en el proceso menor velocidad de remoción del material en un tiempo más prolongado al desbaste, y se notará la diferencia por rugosidad en la zona afectada por las descargas eléctricas. Además de presentarse en la herramienta o electrodo un desgaste menor.

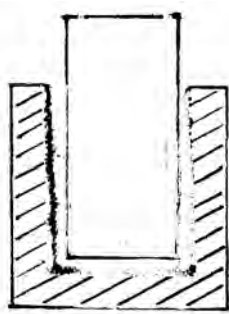


Figura 13. Semiacabado

3.5.3 Pulido. Para esta etapa de mecanización final, el número de las descargas eléctricas por unidad de tiempo es baja, con poca potencia, y por ello el crater dejado en la superficie de la pieza tendrá un tamaño muy pequeño logrando así una mejor presentación de la superficie. En este tipo de maquinado el tiempo de duración será mayor, ya que el desprendimiento de material de la pieza es poco, consiguiéndose de esta manera un desgaste minúsculo en el electrodo, logrando su mejor aprovechamiento.

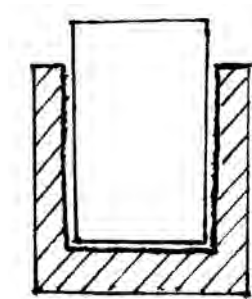

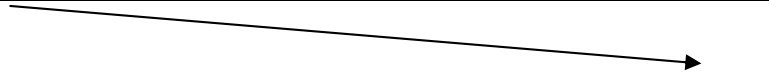
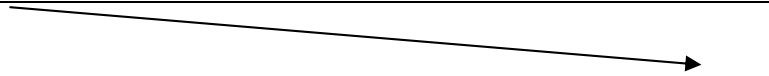
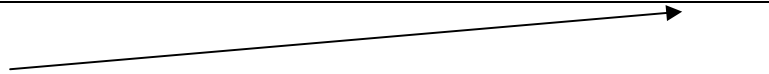
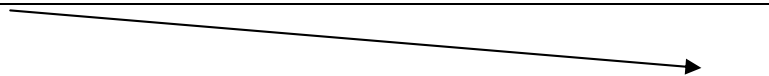


Figura 14. Pulido

En la tabla 1 Podemos resumir el cambio de las diversas características involucradas en los tipos de electro-erosionado utilizado.

Tabla 2. Evolución de las características en función de la electroerosión aplicada.

REGIMENES	Desbaste	Semiacabado	Pulido
Energía de las chispas			
Arranque de metal			
Rugosidad obtenida			
Desgaste del electrodo			
Zona de chispeo			

Refiriéndonos al momento en que se presenta el desbaste. Para determinar las dimensiones del electrodo, se tendrá en cuenta la distancia de separación, una vez se presenta el funcionamiento del proceso, con respecto a la forma final:

$$X_d = g_d \times S_d$$

Para lo cual:

$G_d$  = La distancia entre electrodo y pieza en el transcurso el mecanizado (Gap)

$S_d$  = El espacio de super espesor de materia dejada después del desbaste y que será eliminada en el pulido.

En la parte del pulido, el espacio resultante entre el electrodo de pulido y la pieza final a obtener, es representada por  $X_d$  y equivaldrá a la distancia del electrodo y la pieza pulida.

$$X_d = g_d$$

Si la pieza acaba de estar sometida al desbaste:

$$X_d = g_d + R_d$$

Donde  $R_d$  es el valor de la rugosidad superficial antes del pulido.

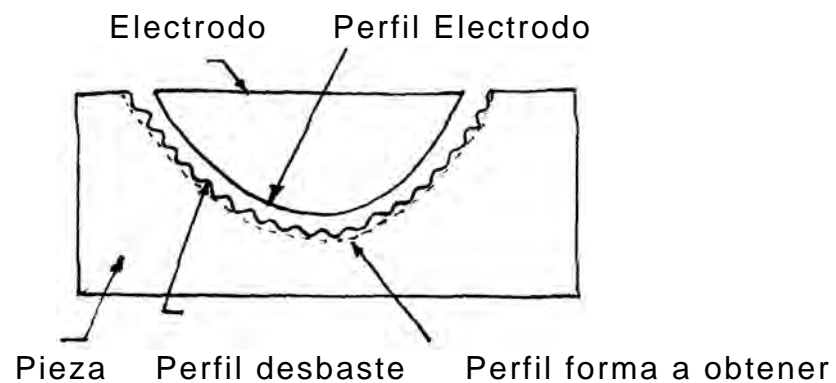


Figura 15. Sobredimensionamiento de un electrodo para desbaste.

### 3.6 ESTADO DE SUPERFICIE

La apreciación característica del estado de superficie alcanzado en el mecanizado convencional (torneado, fresado, esmerilado) no tiene parecido cercano a los acabados de superficie obtenidos por la electroerosión, haciéndose necesario que los instrumentos para el control de superficies obtenidas por mecanizados clásicos, sean adaptados para realizar controles de acabados obtenidos en el maquinado por descargas eléctricas, sin poderse encontrar analogía alguna entre los tipos de mecanizado, es decir, entre las estrías producidas por una herramienta de corte y los cráteres de una superficie mecanizada por electroerosión.

La descarga eléctrica del proceso de mecanizado erosivo produce un cráter cuya geometría es del tipo semiesférico. La forma del anterior estará relacionada directamente con la energía suministrada en el mecanizado.

Por la gran cercanía entre sí de los cráteres, la superficie mecanizada tomará un aspecto similar arenoso, dependiendo de la potencia liberada. Este tipo de acabado en las superficies obtenidas por electroerosión no podrán ser evaluadas por instrumentos de medición para el control de superficies de maquinado clásico, ya que se presentará lugar a tener conclusiones erradas debido al perfilado

de los cráteres. La siguiente figura representa cráteres típico en la superficie obtenida por maquinado electroerosivo.

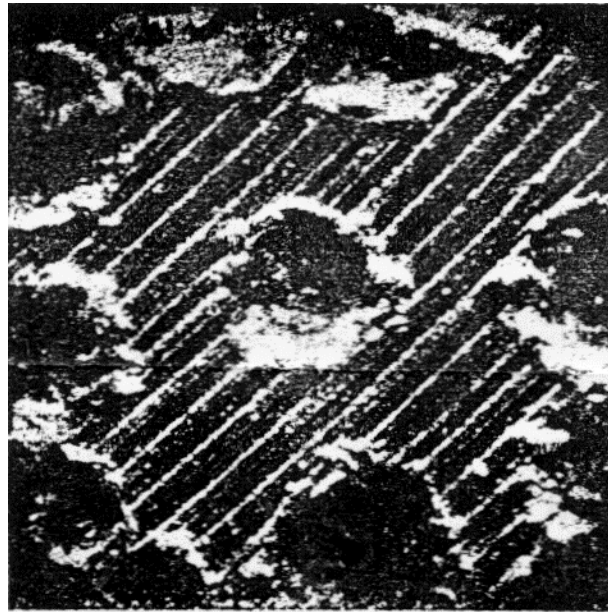


Figura 16. Estado de Superficie

Por consecuencia se determinó un sistema de referencias y medidas de superficie, con el fin de poder prescribir la rugosidad. Las dimensiones o valores de distinción y medidas generalmente se conocen por  $R_{max}$  que indicará la profundidad máxima de rugosidad, y con  $R_a$  se indica el valor medio aritmético de rugosidad, que será de mucha importancia cuando se trabaja para ajustes.

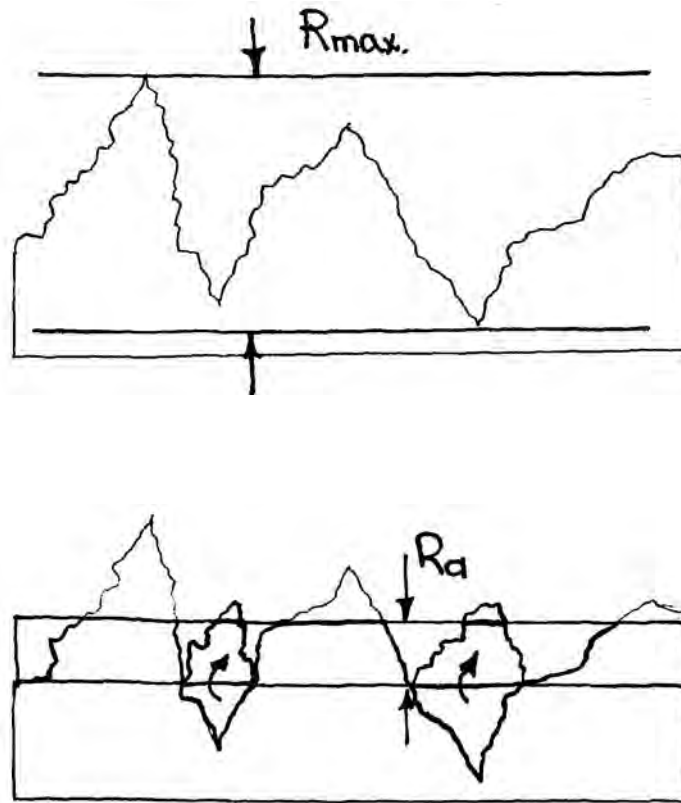


Figura 17. Referencias de Acabado de Superficie

Deberá tenerse en cuenta que la superficie obtenida del mecanizado electroerosivo, no dependerá exclusivamente de la energía aplicada en las descargas eléctricas, sino también por la forma en que se presenta la cristalización del metal o de su grano.

Cambios de la microestructura superficial en las piezas metálicas.

Debido al mecanizado erosivo se muestran en la siguiente figura, donde se aprecia una placa “blanca” superficial heterogénea dendrítica, la que evidencia que se trata de metal fundido y

resolidificado y una capa intermedia, que no ha experimentado efecto térmico de la capa blanca, pero que se ha endurecido por temple o temple revenido, esto dado a que existe una variación de la microestructura y propiedades mecánicas.

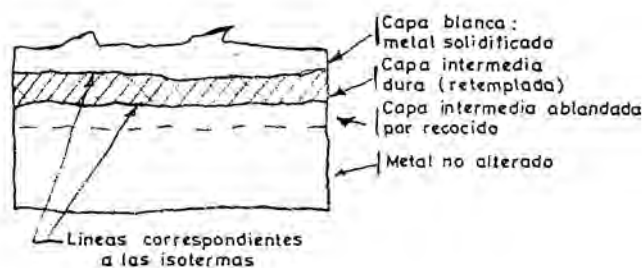


Figura 18. Aspecto de Superficie

### 3.7 DIELECTRICOS

3.7.1 Tipos de dieléctricos. Es necesario utilizar en la electroerosión un aislante entre la pieza de trabajo y el electrodo para que se presente la descarga en forma de avalancha, causante del mecanizado o desprendimiento de partículas en el material a laborar.

Los dieléctricos líquidos son lo que corrientemente se utilizan, entre ellos se tienen los hidrocarburos y aceites minerales.



Los aceites dieléctricos de procedencia mineral se obtienen de un derivado secundario del petróleo y se caracterizan por tener un gran porcentaje en su composición de hidrocarburos nafténicos.

La unión de varios grupos de hidrocarburos influyen para las buenas características de trabajo en el dieléctrico, encontrándose la unidad de los siguientes grupos con sus respectivos porcentajes en su composición.

Hidrocarburos aromáticos: 4 – 7%

Hidrocarburos isoparafínicos: 45 – 55%

Hidrocarburos nafténicos: 50 – 60%

Los aceites sintéticos dieléctricos han tenido una aplicación muy limitada, utilizándose fluidos sintéticos en base de silicona y ésteres de ftalato, por otra parte se están realizando ensayos con aceites dieléctricos de naturaleza principalmente en parafina.

3.7.2 Propiedades de los aceites dieléctricos. La principal características que deben cumplir es producir el aislamiento eléctrico entre el electrodo y la pieza, hasta que el campo eléctrico llegue a un valor determinado denominado rigidez y en ese instante el fluido debe ionizarse y conducir la carga para comportarse de nuevo como un aislante.

Junto al aislamiento deberá prestar refrigeración a la herramienta o electrodo y a la pieza que se mecaniza, debido al efecto térmico del proceso y siendo además un medio eficaz para eliminar partículas de material fundido.

Para que un aceite dieléctrico tenga buen comportamiento en su desempeño deberá tener ciertas características, entre las más importantes se tienen:

#### VISCOSIDAD

Es la oposición que ofrece al movimiento un fluido para deslizarse sobre una superficie sólida. Los aceites dieléctricos se caracterizan por tener baja viscosidad con el objetivo de facilitar la disipación de calor.

Por medio de las normas ASTM D-445 o D-88, las viscosidades máximas para aceites dieléctricos:

A	100°C.....	3 centistokes
	40°C.....	12 centistokes
	0°C.....	76 centistokes

## PUNTO DE FLUIDEZ

Es aquella temperatura de enfriamiento con la cual se logra parar el flujo del aceite y es esta propiedad con la cual se pueden diferenciar los tipos de aceites. Por ejemplo, un aceite con punto de fluidez mayor a 0°C, su composición estará determinada por la presencia de hidrocarburos parafínicos. Para puntos de fluidez del orden de -10°C son característicos de fracciones en donde se tienen mayor composición de hidrocarburos parafínicos. Entre -20 y -35°C de punto de fluidez están relacionadas con fracciones de hidrocarburos aromáticos. Se pueden presentar puntos de fluidez de -40 a -60°C.

## PUNTO DE INFLAMACION

Será la temperatura mínima con la cual el aceite comenzará a emitir cantidades de vapores suficientes para formar una mezcla explosiva con el oxígeno del aire cuando están presentes a una llama. A mayor punto de inflamación más segura será la utilización del dieléctrico.

## TENSION INTERFACIAL

La tensión superficial es una fuerza que produce efectos de tensión en la superficie de los líquidos cuando están en contacto con otro líquido o un contorno sólido. El origen de esta fuerza es la cohesión intermolecular y la fuerza de adhesión del fluido al sólido.

Debido a la tensión superficial y la viscosidad dos líquidos podrán ser solubles e insolubles.

En la superficie de contacto de dos líquidos insolubles, sucederá una interacción molecular que tiende a modificar la tensión superficial de ambos líquidos llamada tensión interfacial.

Debido a que algunos compuestos formados por la descomposición natural de los aceites de origen mineral son solubles tanto con el agua como con el aceite, modificando su tensión interfacial, se provocará un aumento de la humedad de saturación del aceite, haciéndolo mejor conductor de la electricidad.

La tensión interfacial mínima para los aceites de función dieléctrica son de 40 dinas/cm, determinada por el método de la ASTM D-917.

#### PUNTO DE ANILINA

Será la temperatura a la cual un aceite de características dieléctrico se disolverá en un volumen igual de anilina. Servirá como un parámetro de control de calidad, ya que no todas las composiciones de aceites disuelven la anilina al mismo valor de temperatura.

La temperatura de punto de anilina se evalúa por medio de la norma ASTM D-611 y siendo aceptado para aceites dieléctrico el intervalo de 63 a 84°C.

#### FACTOR DE POTENCIA

Es una propiedad de los aceites con la cual se mide las pérdidas de corriente que tienen lugar dentro de la operación. Los valores máximos de factor de potencia se dan a continuación y son evaluados por el método ASTM D-924:

25°	-----	0.05%
100°	-----	0.3%

#### RIGIDEZ DIELECTRICA

Es la rigidez dieléctrica de un aceite aislante la capacidad de sostener un mínimo voltaje para que ocurra entre dos electrodos metálicos un arco eléctrico. Será un índice de la habilidad del aceite para soportar voltajes eléctricos sin fallar.

Cuando se presenta una alta resistencia dieléctrica será la mejor indicación de que el aceite no contiene ningún tipo de contaminante.

### 3.8 METODOS DE LIMPIEZA DEL PROCESO

Es necesario evacuar de la zona de chispeo impurezas debidas al desprendimiento de las partículas de material durante la mecanización, ya que con esto se logra mejor aprovechamiento de las descargas eléctricas.

Las máquinas electroerosionadas están equipadas con accesorios que permiten llevar a cabo limpieza de la zona a maquinar. Dependiendo del tipo de trabajo a realizar se pueden tener las siguientes opciones para realizar limpieza:

#### Limpieza por presión de aceite

Por este método el flujo del dieléctrico se hace circular a presión por medio del electrodo, o de otra manera a través de la pieza o mecanizar como se indica en la figura.

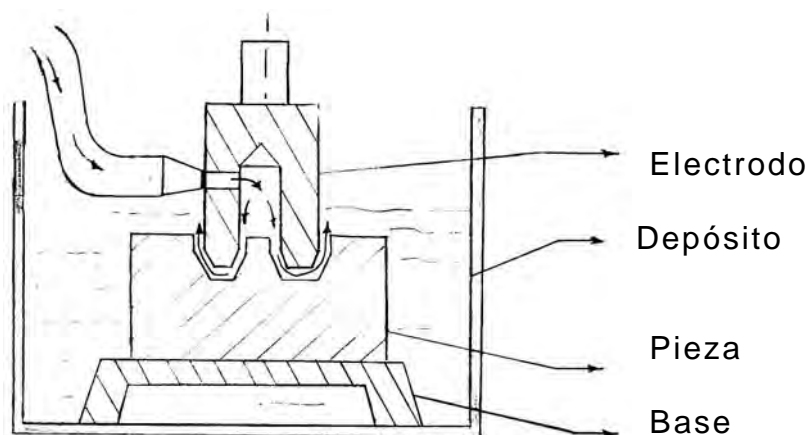


Figura 19. Limpieza por circulación del dieléctrico a través del electrodo.

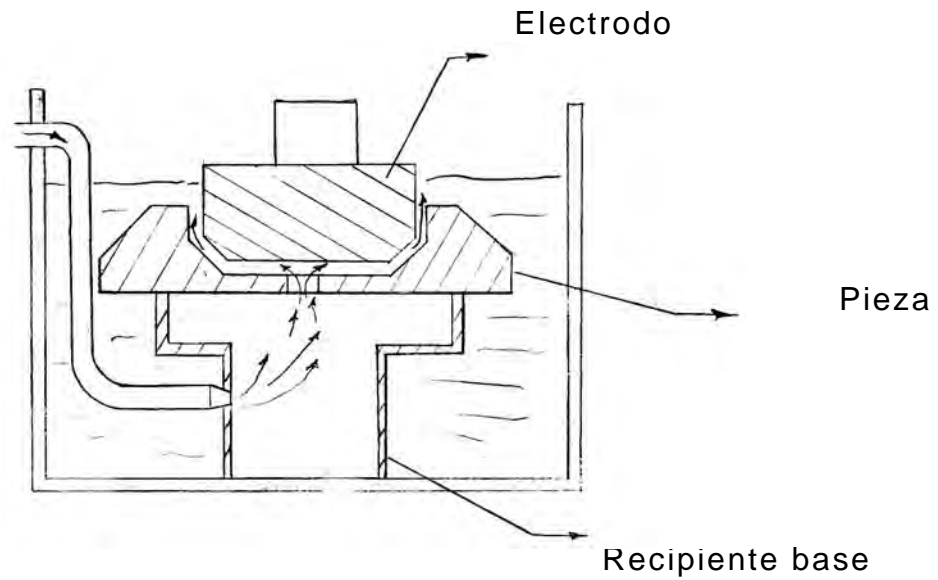


Figura 20. Limpieza a través de la pieza de trabajo.

#### Limpieza por sección del dieléctrico

Con esta forma de limpieza el dieléctrico es aspirado y sus canales pueden estar ubicados en la misma forma en que se localizan para la limpieza por presión, es decir, a través del electrodo y la pieza de trabajo.

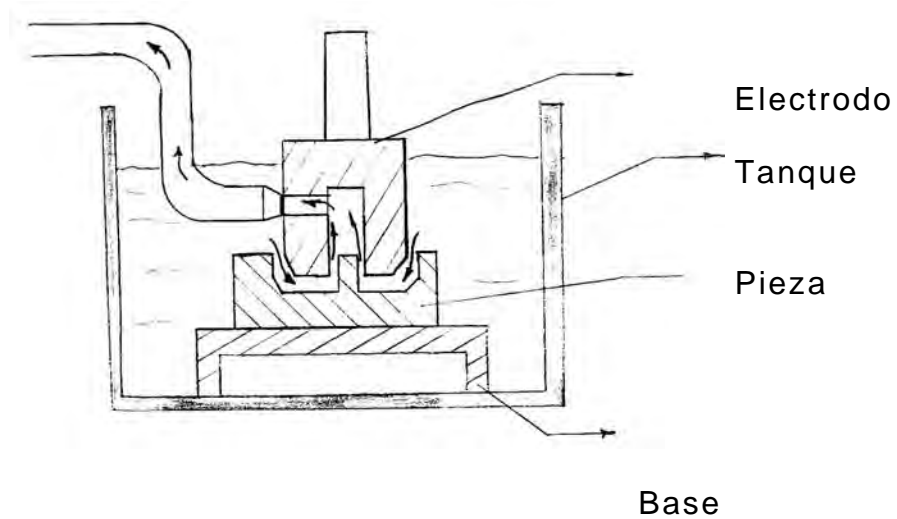


Figura 21. Limpieza a través de la pieza de trabajo.

### Limpieza por chorro directo

Es un tipo de limpieza que es utilizada cuando no se puede realizar limpieza por succión y presión, porque no es posible realizar perforaciones en el electrodo, ni la pieza a mecanizar y se produce un chorro o varios chorros del dieléctrico en el mismo sentido hacia la zona de chispeo.

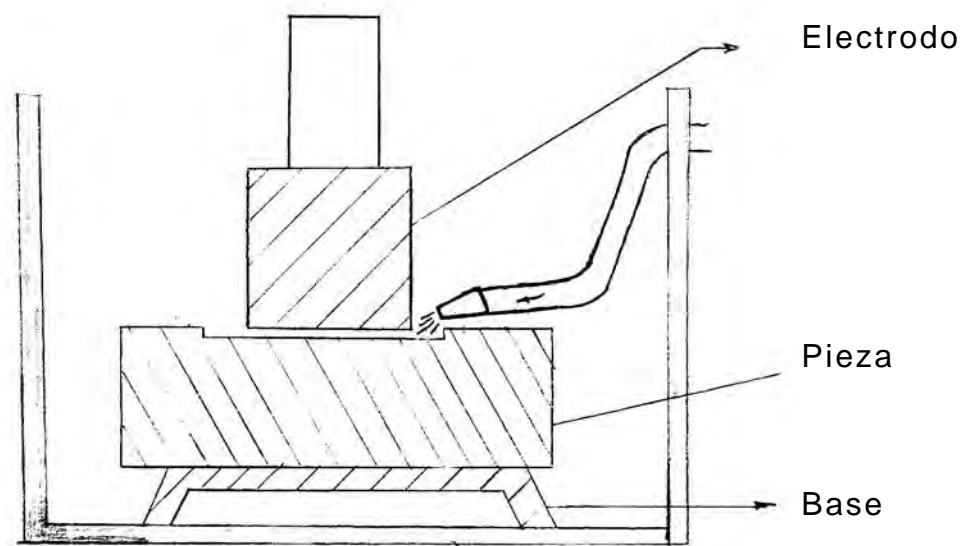


Figura 22. Limpieza por succión del dieléctrico por medio del electrodo.

### Limpieza por desplazamiento

Se produce con llenado completo del tanque y sucede en el movimiento alternativo del electrodo. Cuando sube el electrodo se llena el volumen de mecanizado de la pieza y el dieléctrico limpio



entra en la zona de descarga mezclándose con el dieléctrico contaminado de partículas de material y al bajar de nuevo el electrodo para producirse de nuevo descargas, se retira dieléctrico de la cavidad mecanizada presentando en esta manera la limpieza de la zona.

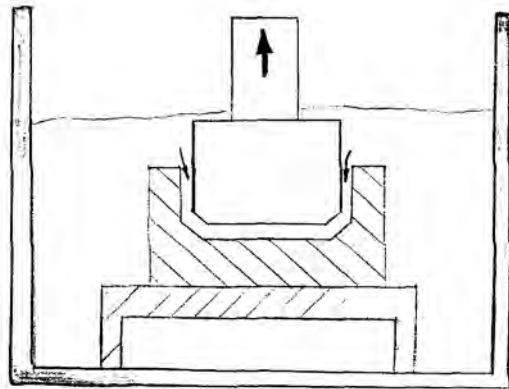


Figura 23. Sube el electrodo y entra dieléctrico limpio

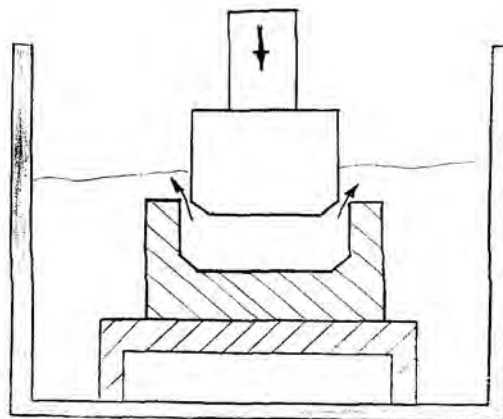


Figura 24. Baja el electrodo desplazando dieléctrico contaminado

## 4. HERRAMIENTAS UTILIZADAS EN LA ELECTROEROSION

### 4.1 MATERIALES

La única herramienta utilizada para mecanizar por descargas eléctricas es el electrodo, por medio del cual se le dará la forma deseada a la pieza de trabajo. Este electrodo deberá estar fabricado de un material cuya principal característica será la conductividad eléctrica, que permita admitir todo tipo de densidades eléctricas que se presenten dentro del proceso de mecanizado.

Entre los materiales utilizados para la fabricación de electrodos se tienen:

- Cobre
- Latón
- Zinc
- Tugsteno
- Grafito

Dentro de los materiales nombrados, el cobre, latón y zinc poseen buenas características o facilidad para ser mecanizados y una buena conductividad térmica y eléctrica. Donde se presentará como temperatura de fusión para el cobre 1085°C y para el Zinc 420°C.

El tungsteno es un metal que tiene una temperatura de fusión excepcionalmente elevado de 2410°C, resistiendo el desgaste, pero extremadamente difícil para ser mecanizado.

El grafito es un material no metálico, generalmente clasificado como un metaloide, no se funde, pero cambia de su estado sólido directamente a vapor aproximadamente a 3350°C. También sus propiedades térmicas y eléctricas son elevadas, que sumadas a la facilidad de mecanización hacen del grafito un material adecuado en la fabricación de electrodos.

El objetivo de un material que ha sido seleccionado como electrodo será en conducir en buena forma las descargas eléctricas que provocan la erosión en la superficie de la pieza a trabajar con el menor desgaste posible del electrodo. Por esto último, el material deberá tener características especiales como un buen arranque de metal, desgaste reducido y capacidad de poder ser maquinado y fabricado con exactitud a un costo bajo.

Serán muy importantes las características de trabajo de los electrodos porque junto a otros parámetros de la electroerosión, brindarán mayor eficiencia en el mecanizado.

La manera más visible en que el material del electrodo afectará la cantidad de arranque del metal será en su resistencia al desgaste. Porque un electrodo desgastado, perderá energía eléctrica y las partículas del electrodo en el espacio de trabajo contribuirán a la inestabilidad, retrasando el proceso de arranque del metal.

La cantidad de desgaste puede ser controlado con factores de alimentación como el tipo de polaridad, ya que un electrodo en condiciones de trabajo y polaridad negativas sufrirá desgaste, pero en las mismas condiciones y una polaridad positiva utilizada, significará un desgaste considerable menor en el electrodo.

El desgaste de un electrodo metálico también tendrá relación con el punto de fusión del mismo, se ha estimado que la temperatura en el punto de las descargas eléctricas es  $5.000^{\circ}\text{C}$ , lo suficiente para fundir la mayoría de los metales a trabajar y también los electrodos, a causa de lo anterior es inevitable que se produzca el desgaste.

El acabado superficial de una pieza metálica estará influenciado por la capacidad del electrodo para soportar el desgaste. En la medida

que avance el electrodo durante el ciclo de mecanizado, producirá una imagen invertida cualesquiera que sea su forma; esto se aplicará también a las irregularidades de superficie, que no son incluidas durante el mecanizado del electrodo, pero si por el desgaste. Por consiguiente, al desgastarse el electrodo como resultado de pérdida de material a elevadas temperaturas, será visible en la pieza de trabajo y por lo tanto se conseguirá un tipo de acabado en la superficie no esperado. Además se producirán la aparición de cavidades producidas por las chispas individuales y su magnitud será determinada por la energía utilizada y el punto de fusión de la pieza que se trabaje.

#### 4.2 TIPOS DE FABRICACION

Con el material seleccionado se pueden tener diversas alternativas para conseguir la geometría de trabajo del electrodo.

Se obtienen perfiles de electrodo por trabajo en frío, donde se pueden utilizar muchas técnicas para conformar un material, pero se presentan ventajas y limitaciones debidas al trabajo en frío:

- Se puede endurecer el metal y producir una forma final deseada.
- Al final del proceso de formado se consiguen tolerancias dimensionales y buenos terminados superficiales.

- Resulta un método económico cuando se producirán gran cantidad de piezas pequeñas.

- En el proceso de trabajo en frío se pierden algunas propiedades en el material como la ductilidad, pero la más importante es la conductividad eléctrica que es factor decisivo dentro del proceso de mecanizado erosivo por sus características.

Mediante el trabajo en caliente se le pueden dar formas útiles a un metal, se ganarán propiedades importantes como tenacidad, pero será más difícil el controlar la precisión dimensional de las piezas de trabajo.

Debido a lo anterior se utilizará como método de fabricación de electrodos los mecanizados convencionales como lo son: torneado, fresado y rectificado, caracterizados dentro de los materiales aptos para electrodos el grafito debido a su facilidad para ser mecanizado en las diversas formas. Por medio de los mecanizados clásicos, es factible obtener las dimensiones finales del electrodo de trabajo.

## 5. PARAMETROS QUE INFLUYEN POSTERIOR AL MECANIZADO

En el proceso de mecanizado por electroerosión se presentarán incrementos de temperatura producidos por la fusión del material debido a las descargas eléctricas. Este factor es importante y deberá ser tenido en cuenta para el control de las dimensiones finales en el mecanizado. Esto se tomará tanto para las medidas de los electrodos, como también en la forma final que se espera de la superficie del material.

### 5.1 DEFORMACIONES TERMICAS

Al ganar un átomo energía térmica, empezará a vibrar, comportándose como si tuviera un radio atómico mayor. La distancia que en promedio tenían los átomos se incrementará y a consecuencia las dimensiones del material aumentarán. El cambio que se pueda presentar por unidad de longitud estará en función del coeficiente lineal de expansión térmica:

$$\alpha = \frac{L_f - L_o}{L_o (T_f - T_o)}$$

Donde:

Lf y Lo: Son las longitudes finales e iniciales del material.

Tf y To: Serán las temperaturas de comienzo y final del material.

Aquellos materiales cuyo valor de su coeficiente de expansión térmica sea bajo, mantendrán sus dimensiones con mayor precisión al sufrir cambios de temperatura.

La siguiente tabla indica valores de coeficientes de expansión térmica para algunos aceros:

Tabla 3. Valores de coeficiente de expansión

MATERIAL	Coeficiente de expansión térmica 10-6 m/m°C				
	20°C-100°C	20°C-200°C	20°C-300°C	20°C-400°C	20°C-500°C
Aceros Aisi 8620	11	12.1	12.9	13.5	13.9
4140	11.1	12.1	12.9	13.5	13.9
4340	11.1	12.1	12.9	13.5	13.9
1045	11.1	12.1	12.9	13.5	13.9
Acero moldes M238 Bohler	12.8	13	13.8	14	14.2
Acero moldes martensítico M230 Bohler	10.4	10.8	11.2	11.6	11.9



## 5.2 ESFUERZOS TERMICOS

Los esfuerzos térmicos que pueden afectar a la superficie del material erosionado son diferentes a los producidos por cambios de temperatura en donde no es posible que se lleve a cabo expansión del material.

Para materiales en estado de colada y que se mecanizarán por descargas eléctricas no presentarán esfuerzos térmicos perjudiciales en la zona erosionada ya que el material estará libre de tensiones internas.

En aceros que se han tratado térmicamente como el caso del templado y cuyo enfriamiento se hubiese realizado de forma anormal, se presentarán esfuerzos residuales en el material, que sumados a la tensión de trabajo originada en el proceso erosivo y necesaria para romper los enlaces de unión de los átomos del material, podrán exceder el límite elástico y con ello genera la aparición de grietas en la superficie trabajada.

Por lo anterior se hace necesario llevar a cabo un buen tratamiento térmico, adicionalmente de una buena eliminación de tensiones con el objeto de evitar problemas superficiales posteriores al mecanizado erosivo.

Debido a la naturaleza del mecanizado por descargas eléctricas, se puede dar lugar a que la zona mecanizada afectara el material considerablemente, pero el efecto térmico respecto a la superficie es de una profundidad muy pequeña que se podrá apreciar de mejor forma en las microfotografías anexadas. Esta parte del material tendrá grandes esfuerzos térmicos por las elevadas temperaturas que se alcanzan y podrá ser removida por mecanizado convencional de pulido, por lo que se obtendrá al final una superficie libre de alteraciones y de tensiones por electroerosionado.

## 6. DESCRIPCION DE LAS MAQUINAS EROSIONADAS

### 6.1 COMPOSICION MECANICA

Esta parte de las máquinas erosionadas está integrada por el sistema gobernador del movimiento del electrodo denominado pinola, la unidad para el control y medición del desplazamiento y el sistema hidráulico para el dieléctrico.

La pinola de disposición central, tiene accionamiento por servo, evitándose con esto esfuerzos a que pueden estar sometidos los cojinetes de la guía. El desplazamiento es realizable por bolas (Ver Figura 25).

El sistema de medición de la profundidad posee un comparador de carátula, husillos micrométricos y reglas milimétricas provista en el nonio. En el conjunto se incorpora un sistema de parada automática cuando se llega a la medida determinada (Ver Figura 25).

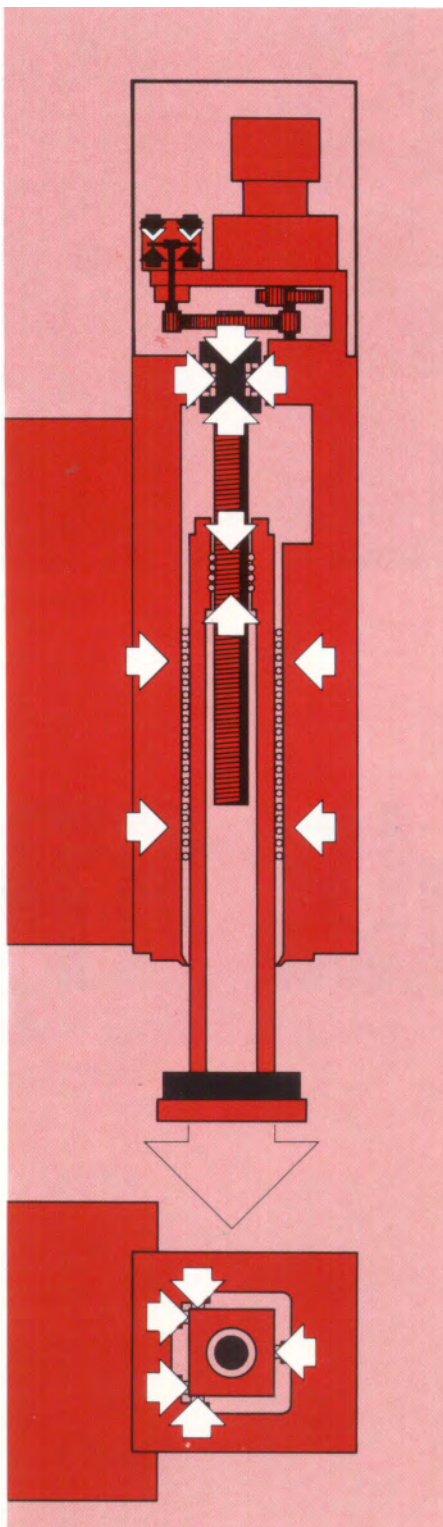


Figura 25. Mecanismo de movimiento de la pinola

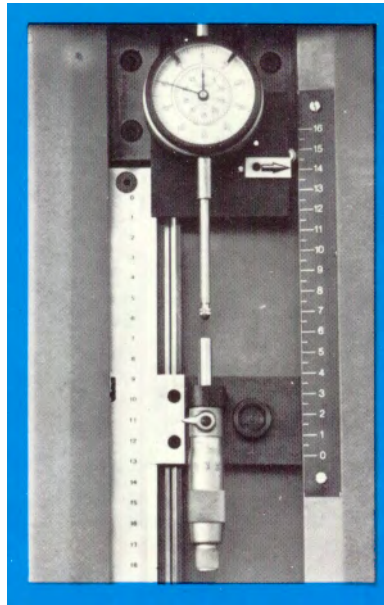


Figura 26. Bloque distribuidor

La máquina posee una mesa de coordenadas con guías de deslizamiento robustas, además nonios situados frontalmente para facilitar las maniobras de posicionamiento.

El sistema de manejo del dieléctrico está compuesto por un bloque distribuidor y el grupo del dieléctrico.

El bloque distribuidor está equipado de válvulas de regulación e indicación manométrica para la realización de lavados a presión y aspiración, con acoplamientos enchufables para la conexión de mangueras, el depósito de trabajo tiene puertas giratorias extraíbles que brindan mayor comodidad de trabajo.

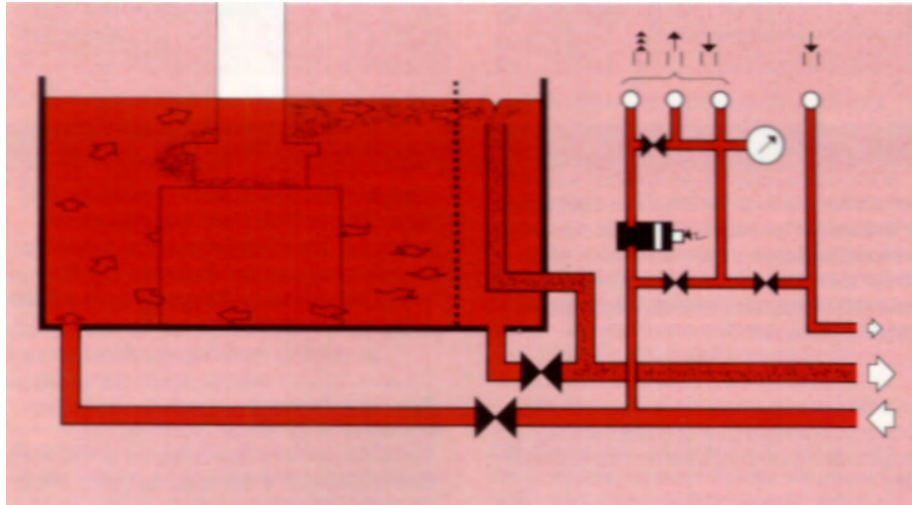


Figura 27. Bloque Distribuidor

El grupo dieléctrico presenta un tanque de construcción cerrada y cuya capacidad puede llegar hasta los 450 litros. El llenado y lavado a presión mediante bombas centrífugas de elevada reserva en presión y caudal.

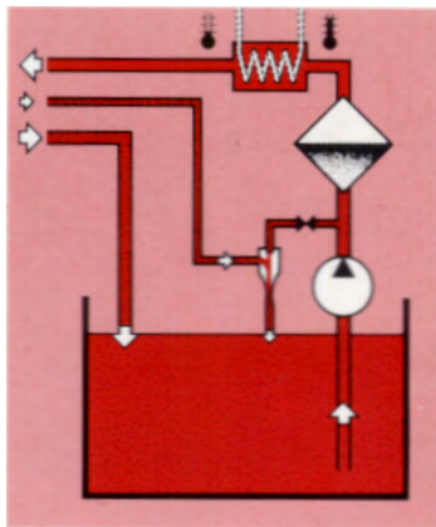


Figura 28. Grupo dieléctrico.

## 6.2 COMPOSICION ELECTRICA

De acuerdo a la forma en que se generan las descargas eléctricas las máquinas erosionadoras se diferenciarán por ser de condensador o de impulsos rectangulares.

En las máquinas de condensador, éste se conectará en paralelo con el generador, utilizar el condensador tiene por objeto producir los impulsos que provocarán las descargas eléctricas entre electrodo y pieza a mecanizar. En serie con el generador se conecta una resistencia que repercute en el tiempo de carga para el condensador. Cuando la diferencia de potencia entre el electrodo y la pieza originada desde el generador es muy elevada, salta la chispa entre ambos y el condensador se descargará, para luego ser de nuevo cargado el condensador por acción del generador y avanzar cada vez la erosión.

Para mantener la distancia del electrodo y la pieza constante se tiene un dispositivo de avance automático que actuará en todo el proceso de mecanizado.

Para minimizar el desgaste de los electrodos se aplica una corriente rectangular.

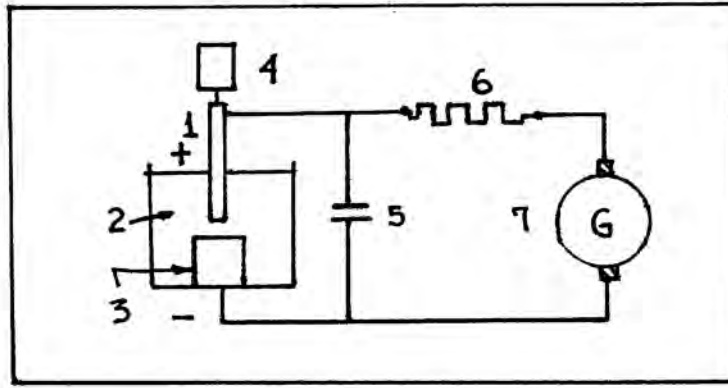


Figura 29. Esquema de máquina de erosionar provista de condensador

- |  |                      |
|--|----------------------|
| 1. Electrodo de latón.                             | 5. Condensador.      |
| 2. Líquido dieléctrico.                            | 6. Resistencia       |
| 3. Pieza de trabajo.                               | 7. Generador de C.C. |
| 4. Dispositivo de avance automático del electrodo. |                      |

En las máquinas de impulsos rectangulares se utilizan interruptores ultrarápidos. El circuito está conformado por un generador que transformará una tensión de continua a una forma rectangular de frecuencia dada, transistores, resistencias y capacidades.

Los transistores permiten en una sola dirección el paso de la corriente, por lo anterior los generadores emiten los impulsos en forma rectangular. Estos impulsos serán amplificados para llegar por último a un interruptor ultrarápido.

El interruptor cerrará el circuito al aplicar la fuerza electromotriz solo cuando recibe del generador un impulso que hace la base positiva,



por esto en el circuito de la descarga, la corriente solo pasa en un solo sentido.

Al aplicarse a la base del transistor una señal de forma rectangular, la fuerza electromotriz de forma continua se conectará y desconectará a la frecuencia de la señal y, al no variar la polaridad, las descargas eléctricas son siempre desde el electrodo hacia la pieza.

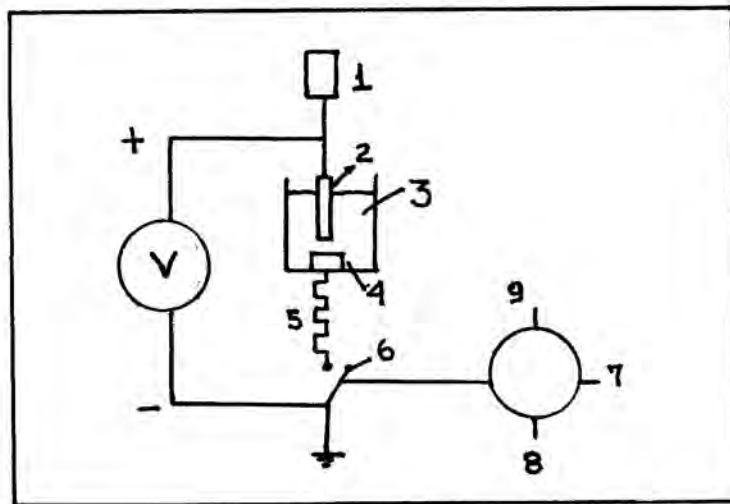


Figura 30. Esquema de máquina de erosión por impulsos rectangulares.

- |  |  |
|--|--|
| 1. Servomecanismo para avance del electrodo. | 6. Interruptor formado por transistor. |
| 2. Electrodo.                                | 7. Base                                |
| 3. Dieléctrico.                              | 8. Emisor                              |
| 4. Pieza a mecanizar.                        | 9. Colector                            |
| 5. Resistencia para regular descargas.       |  |

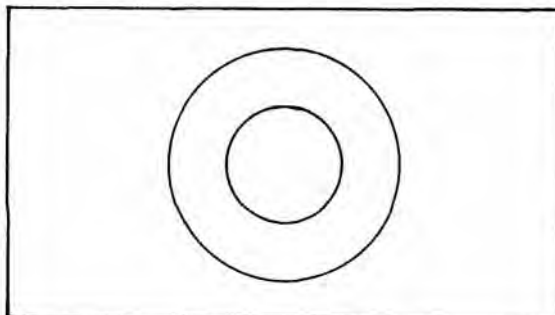
## 7. CALCULOS Y FACTORES DE SELECCIÓN EN EL DISEÑO Y CONSTRUCCION DE MOLDES POR ELECTROEROSION

Antes de llevar a cabo el mecanizado por erosión y haberse realizado una preparación del material, se deben tener en cuenta diversos factores relacionados con las medidas finales a obtener en la pieza. El tiempo de mecanizado, el desgaste de los electrodos y la rugosidad exigida en la superficie maquinada, son aspectos definitivos que influyen en la producción.

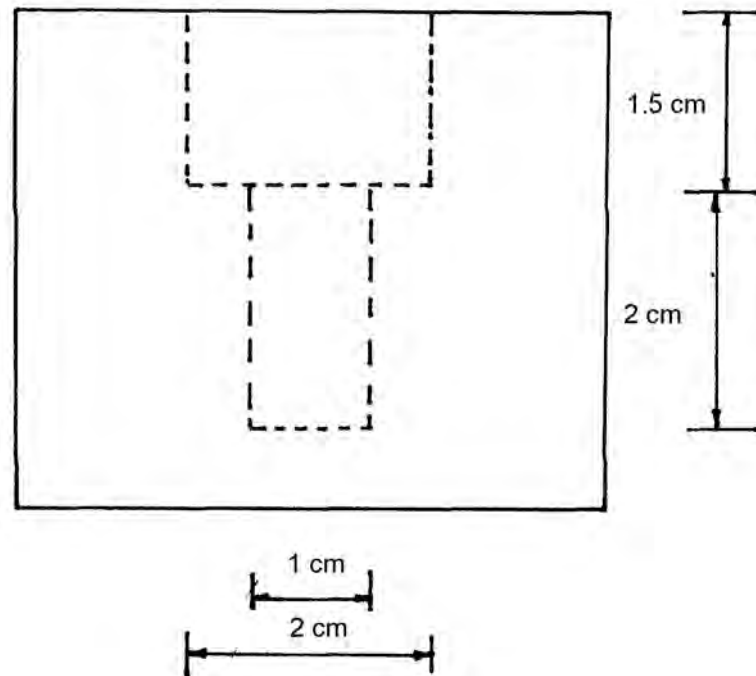
Por medio del siguiente ejemplo, donde se determinarán las condiciones de mecanizado para obtener una geometría definida y medidas determinadas como las descritas en la figura, se podrán identificar varias del proceso de maquinado.

Las formas que se desean obtener en la pieza son:

V.S.



V.F.



y para ello determinaremos las dimensiones del electrodo.

La pieza es de acero P-20 y el electrodo será de cobre electrolítico calculamos el volumen de material que se erosionará.

$$V_T = V_1 + V_2$$

$$V_1 = \pi \times (1\text{cm})^2/4 \times 2\text{cm} = 1.57\text{cm}^3 = 1570 \text{ mm}^3$$

$$V_2 = \pi \times (2\text{cm})^2/4 \times 1.5\text{cm} = 4.712\text{cm}^3 = 4712 \text{ mm}^3$$

El área 1 es igual a 0.785 cm<sup>2</sup>, para el mecanizado de esta región se utilizan datos de mecanizado de erosionadoras Agie con polaridad positiva (Ver Anexos).

Fp $\text{cm}^2$	IT	T( $\mu\text{s}$ )	Ua	$\tau$	Rmax	Vw	Uv	M	2 GAP
0.5-1	2	100	35	24	23	28	0.8	0.25	0.10

Donde:

FP = será el área de erosionado en  $\text{cm}^2$

VW = La rata de erosionado por tiempo ( $\text{mm}^3/\text{min}$ )

Rmax: Rugosidad máxima en la superficie de trabajo

GAP: Zona afectada o de chispeo

UV: Desgaste volumétrico del electrodo

Ua: Es el voltaje de trabajo

IT: Es la corriente descarga

Calculamos el tiempo de erosionado

$$\frac{28 \text{ mm}^3}{\text{min}} \times t = 1570 \text{ mm}^3$$

$$t = \frac{1570 \text{ mm}^3}{28 \text{ mm}^3/\text{min}}$$

$$t = 56 \text{ min}$$

La segunda área a erosionar es  $(3\text{cm})^2 \times \pi/4 = 3.1416 \text{ cm}^2$

Utilizando los siguientes datos:

Fpcm <sup>2</sup>	IT	T(μs)	Ua	τ	Rmax	Vw	Uv	M	2 GAP
3-5	5	150	30	25	38	109	1.8	0.35	0.15

Como tenemos:

$$V2 = 4712 \text{ mm}^3$$

$$t = \frac{4712 \text{ mm}^3}{109 \text{ mm}^3/\text{min}}$$

$$t = 43 \text{ min}$$

De esta forma el tiempo total de mecanizado será de 93 min.

Con los valores del Gap y la dilatación que sufrirá el material del electrodo se determinarán las medidas de la herramienta para cumplir con las dimensiones exigidas.

Las condiciones finales del segundo mecanizado determinan mayor longitud del gap se diseñará con este valor = 0.15m.

El diámetro de la primera zona es de 1cm.

$$\phi \text{ corregido} = 10\text{mm} - 0.15 \text{ mm}$$

$$\phi \text{ corregido} = 9.85 \text{ mm}$$

Pero el punto de fusión del cobre es de 1085°C, tendremos en cuenta el incremento de la deformación utilizando la siguiente ecuación:

Coeficiente de expansión térmica del cobre  $\alpha = 16.6 \times 10^{-6} \text{ cm/cm } ^\circ\text{C}$ .

$$D_{\text{final}} = 9.85 \text{ m} = 0.985 \text{ cm}$$

$$\Delta D = \alpha D \Delta T$$

$$D_f - D_i = \alpha D_i \Delta T ; \Delta T = 1085^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C} = 1055^\circ\text{C}$$

$$D_f = D_i (\alpha \Delta T + 1)$$

$$D_i = \frac{0.985 \text{ cm}}{(16.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \times 1055^\circ\text{C} + 1)}$$

$$D_i = 0.968 \text{ cm}$$

Se realizará lo mismo para el diámetro de 2cm

Diámetro corregido = 20mm – 0.15mm

$$D = 19.85 \text{ mm}$$

Con el efecto de expansión se tiene

$$D_i = \frac{1.985 \text{ cm}}{(16.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \times 1055^{\circ}\text{C} + 1)}$$

$$D_i = 1.950 \text{ cm}$$

La longitud de los escalones estará afectada por el incremento de la temperatura y no de los Gap.

$$L_f = 2 \text{ cm}$$

$$\frac{2 \text{ cm}}{(16.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \times 1055^{\circ}\text{C} + 1)} = L_i$$

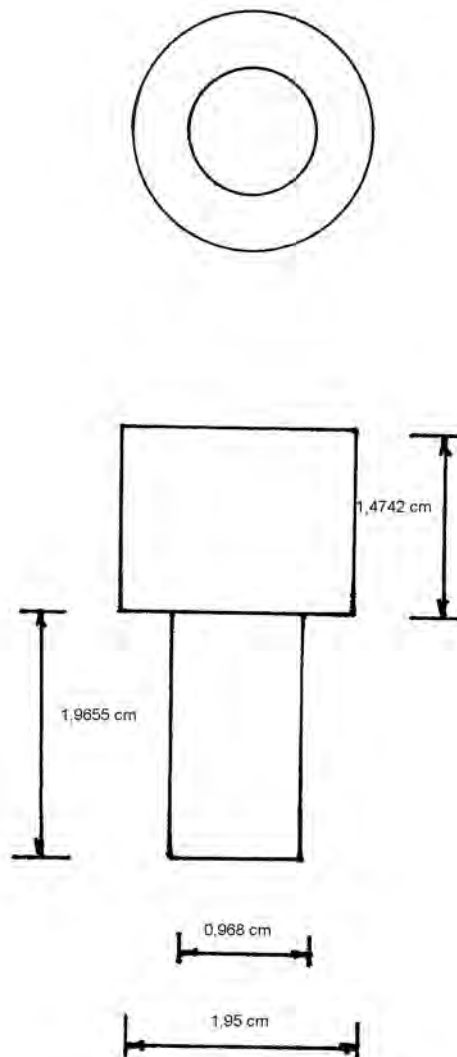
$$L_i = 1.9655 \text{ cm}$$

$$L_f = 1.5 \text{ cm}$$

$$\frac{1.5 \text{ cm}}{(16.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \times 1055^{\circ}\text{C} + 1)} = L_i$$

$$L_i = 1.4742 \text{ cm}$$

De esta manera se determinan las dimensiones del electrodo





Como otra opción se puede llevar a cabo el mecanizado de la siguiente manera.

Erosionar la zona con sección de  $0.785 \text{ cm}^2$  y volumen de  $1570 \text{ mm}^3$  utilizando datos de la tabla.

Fp $\text{cm}^2$	IT	T( $\mu\text{s}$ )	Ua	$\tau$	Rmax	Vw	Uv	M	2 GAP
1-3	3	75	35	25	24	53	2.1	0.25	0.12

Y obtendríamos el siguiente tiempo de mecanizado.

$$t = \frac{1570 \text{ mm}^3}{53 \text{ mm}^3/\text{min}}$$

$$t = 29.6 \text{ min}$$

La segunda región se erosiona con los siguientes datos de la máquina.

Area región =  $3.1416 \text{ cm}^2$  y el volumen  $4712 \text{ mm}^3$

Fp $\text{cm}^2$	IT	T( $\mu\text{s}$ )	Ua	$\tau$	Rmax	Vw	Uv	M	2 GAP
5-7	6	200	30	25	47	140	1.5	0.4	0.18

$$t = \frac{4712 \text{ mm}^3}{140 \text{ mm}^3/\text{min}}$$

$$t = 33.6 \text{ min}$$

Con un tiempo total de mecaniado de 63.2 minutos, con una diferencia de 30 minutos utilizando estos datos de mecaniado.

Se puede apreciar que los valores de rugosidad en la superficie obtenida cambian, junto a las longitudes del Gap y el desgaste del electrodo al variar las condiciones de mecanizado y los dimensionamientos de las herramientas.

También se pueden mecanizar con electrodos de desbaste que disminuyen el tiempo del maquinado para luego dar un pulido final ahorrando así tiempo de producción.

## 8. PRUEBAS Y COMPORTAMIENTOS DEL ACERO P-20 EN LA DETERMINACION DE CAMBIOS ESTRUCTURALES

### 8.1 TRATAMIENTOS TERMICOS

El acero utilizado en las pruebas de mecanizado erosivo fue el P-20 de marca Bohler M238, cuya composición química del material en suministro es:

C	Si	Mn	Cr	M	Ni
0.38%	0.3%	1.5%	2%	0.2%	1.1%

Su aplicación general son los moldes para transformación de materiales plásticos, piezas de maquinaria y herramientas en general.

Para el tratamiento térmico del temple de acuerdo a su composición de carbono de 0.38% será necesario alcanzar una temperatura entre 840 y 860°C para conseguir que todo el acero pase a su estado austenítico y realizar luego el enfriamiento rápido

en aceite que permita obtener en el acero el constituyente de martensita.

El estado de suministro del Boehler M238 es un prebonificado con una dureza de 30 HRC, lo cual hace indispensable un templado, por ser una dureza baja, ya que los valores de durezas recomendadas para moldes de inyección de materiales termoplásticos, moldes de compresión son del orden de 50 a 54 HRC y para moldes de soplado la dureza recomendable estará en el intervalo de 45 a 54 HRC.

El acero luego del tratamiento térmico de temple suele quedar generalmente muy duro y frágil, corrigiéndose esta situación a través del tratamiento de revenido, que consiste en calentar el material por debajo de su primer temperatura crítica (720-740°C) para después del sostenimiento ser enfriado al aire. El objetivo principal del revenido no es el de eliminar los efectos producidos por el temple, sino el de modificarlos, disminuyendo con esto el valor de su resistencia y dureza para aumentar la tenacidad, eliminando además las tensiones internas en el acero templado debido al enfriamiento rápido.

La figura 31 es el diagrama de revenido del material utilizado cuando ha sido templado a 850°C, en una sección de probeta cuadrada de 50mm.

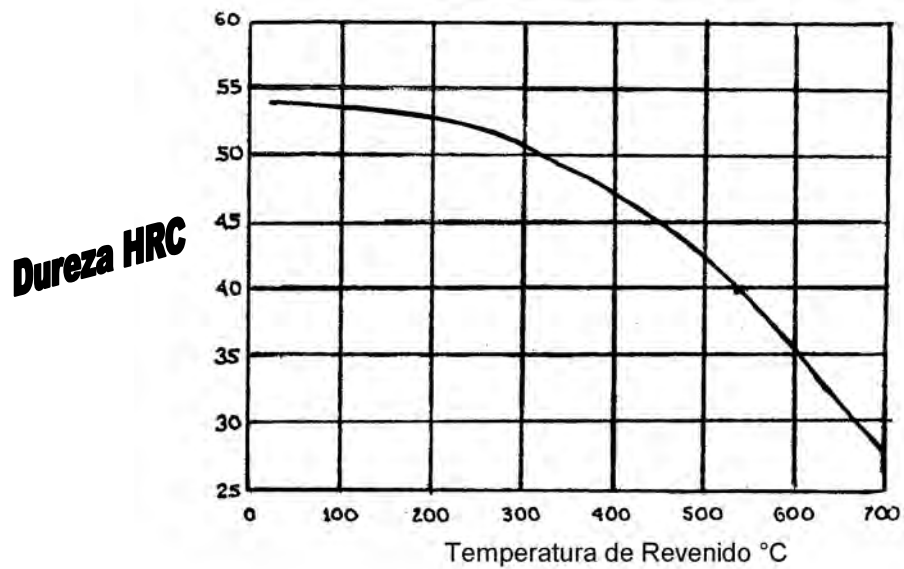


Figura 31. Diagrama de revenido

Para el tratamiento del temple, llevar el material a una primera etapa de calentamiento a 600°C, por debajo de la primera temperatura crítica del acero ayudará a que éste llegue a la zona de austenización con una mejor estabilidad en la temperatura, para realizar el sostenimiento mayor, ya que al rebasar las temperaturas críticas, el carbono formará solución con la austenita, buscando con ello que el porcentaje de carbono tienda a ser igual en las diversas regiones de toda la masa, pero esto se puede retardar por segregaciones no metálicas que formarán barreras entre los granos, por el fósforo y oxígeno tendiendo a retener el carbono o por presencia de elementos aleados como el cromo, níquel, etc., se podría llevar el calentamiento a temperaturas mayores y con esto lograr de una forma más rápida la

difusión del carbono, pero a mayores incrementos de temperatura se dará lugar al crecimiento de los cristales.

Si la duración total del calentamiento de la pieza fue rápida el sostenimiento de la temperatura será mayor y cuando el tiempo de llegar a temperatura de austenización completa fuese largo, no será necesario demasiado sostenimiento ya que la penetración del calor en la masa fue mejor.

El tiempo de sostenimiento de la temperatura oscila entre  $\frac{1}{2}$  y 1 hora por pulgada de espesor.

La siguiente figura nos muestra las etapas para realizar el tratamiento térmico de temple y revenido.

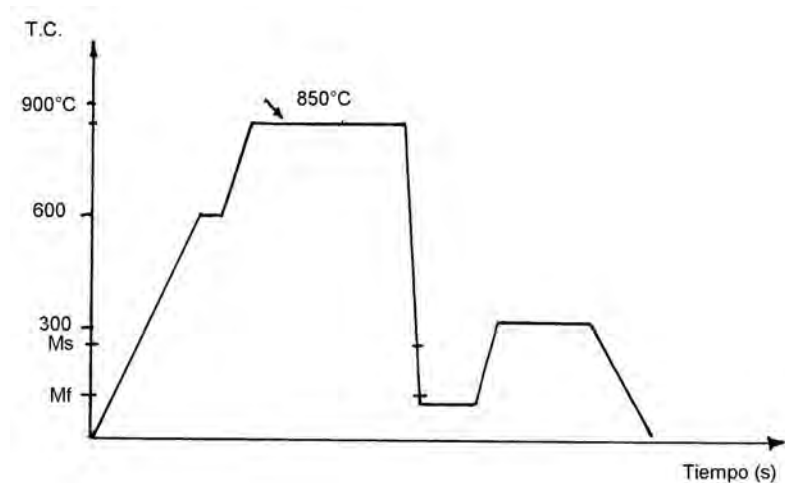


Figura 32. Tratamiento térmico de temple y revenido

## 8.2 PRUEBAS DE MECANIZADO

Se erosionaron 27 probetas, 13 en estado de suministro de 32 HRC y con electrodo de grafito, las demás templadas y revenidas a 54 HRC y con electrodo de cobre y polaridad positiva.

La rata de erosionado mínima fue de  $0.6 \text{ mm}^3/\text{min}$  y la máxima de  $440 \text{ mm}^3/\text{min}$ .

Las profundidades estuvieron entre los valores de 15 y 35 milésimas de pulgada.

## 8.3 MEDICION DE RUGOSIDAD

Para los mecanizados más finos, realizados con electrodo de grafito en material de suministro, se tomaron 4 pruebas de rugosidad para ratas de erosionado de (5.5, 14, 28, 88)  $\text{mm}^3/\text{min}$ .

Composición Química: Análisis de composición en porcentaje para el material en espectrómetro de emisión atómica.

Medición de durezas: Por las características del mecanizado se realizaron pruebas de microdureza en las zonas afectadas por el

erosionado y en regiones que no fueran afectadas por las descargas eléctricas.

Pulido y Ataque: La preparación de las probetas se hizo con lijas desde la número 80 hasta la 600 para luego trabajar el pulido final en paños y atacar con nital al 2% para la realización del trabajo en microscopio.

#### 8.4 ANEXOS DE PRUEBAS

##### ENSAYOS METALOGRAFICOS

De las siguientes pruebas obtenidas, se presentan la siguientes microfotografías que nos permiten visualizar los efectos posteriores al erosionado en la pieza trabajada.

##### FOTOGRAFIA #1 (50x):

Aquí se puede apreciar la profundidad de un cráter en mecanizado de desbaste, donde la circunferencia distorsionada central representa la última parte alcanzada por las descargas eléctricas, enseguida una zona descrita por un semióvalo que es intermedia y por efecto del enfriamiento rápido el microconstituyente es martensita. La parte de afuera oscura es material no afectado, el cual es martensita revenida con 54 HRC. Las características del mecanizado en esta prueba son: 143.1 mm<sup>3</sup>/min con electrodo de cobre electrolítico de diámetro de 3/4"



y una profundidad para la pieza de 0.03" en corte. Se alcanzó 45V y 20 Amp (DC). El tiempo correspondiente al erosionado fue 1.51 minutos.

Los datos completos técnicos que se utilizaron se encuentran en las tablas de mecanización, p. 13.

#### FOTOGRAFIA #2 (50x):

Podemos notar efectos nocivos del mecanizado por erosión en la zona solidificada, cercana esta otra región blanca más fina cuya reacción corresponde a martensita basta afectada por el incremento en la temperatura. La zona oscura no tuvo alteración por el mecanizado.

La prueba realizada fue de semidesbaste con  $33\text{mm}^3/\text{min}$  el electrodo de cobre y una profundidad de 0.015" y la duración fue de 3.29 min la remoción de material se llevó a cabo a 50V y 6.5 amp en la pág. 9 se anexan en las tablas los datos de mecanizado.

#### FOTOGRAFIA #3 (50x):

Se puede diferenciar la zona afectada por el mecanizado con descargas eléctricas y la región no afectada. Los puntos negros marcan la mayor profundidad que se alcanzo en el erosionado y determinan el estado de rugosidad.

El desprendimiento de material se presenta a  $58\text{mm}^3/\text{min}$  con electrodo de cobre de  $\frac{3}{4}$ " a una profundidad de 0.015". El tiempo de erosión fue de 1.87min con 40V y 10.5 amp. La tabla de la pág. 9 completa los datos de mecanizado.

En las siguientes microfotografías se observan las zonas formadas en el material vistas en un plano perpendicular al erosionado.

#### FOTOGRAFIA #4

Representa las tres zonas que se producen por mecanización; la primera es la capa blanca o fundida, luego la región intermedia retemplada y por último la matriz no afectada.

La zona blanca se origina de la evaporación del material debido a las elevadas temperaturas que se alcanzan comprendidas entre los  $10.000$  y  $50.000^\circ\text{C}$  que forman pequeñas gotas de material fundido y que son arrastradas por el líquido dieléctrico.

En esta capa sus propiedades mecánicas disminuyen debido a que se alcanzan incrementos de la temperatura de austenización y los átomos de carbono al cristalizar se podrán ubicar en el centro de las aristas y de los cubos elementales del hierro gamma en forma intersticial, no pudiendo con ello ocupar las posiciones correspondientes en los centros de aristas y cubo, posteriormente se

tendrá un microconstituyente martensítico final con una distribución desordenada en su celda unitaria.

Esta prueba se realizó con un desbaste a  $200\text{mm}^3/\text{min}$  con electrodo de grafito de  $\frac{1}{2}$ " a una profundidad de 0.025" y un tiempo de 0.39 min. La pieza es de estado de suministro prebonificada a 30 MRC. El voltaje alcanzado fue 55V y 20 amp.

La tabla de la pág. 27 completa datos de erosionado.

FOTOGRAFIA #5 (100x):

De nuevo se tienen las 3 regiones producto de la erosión, pero con diferencia de que el microconstituyente de la zona intermedia es martensita revenido, luego del tratamiento térmico a  $300^\circ\text{C}$  durante una hora.

El mecanizado es de desbaste a  $202\text{ mm}^3/\text{min}$  con electrodo de cobre de  $\frac{3}{4}$ " a una profundidad de 0.01" en un tiempo de 0.35 min. El voltaje alcanzado fue 55V D.C. y 18 Amp.

La tabla de la página 14 ofrece los datos de electroerosionado.

#### FOTOGRAFIA #6 (50x)

Para esta prueba de desbaste las tensiones internas del material, sumadas a las del mecanizado erosivo sobrepasan el límite elástico, debido al aspecto del micro-constituyente martensítico que se presenta en forma acicular que forma agujas en zig-zag con ángulos hasta  $60^\circ$  con lo cual se facilita la propagación de las fisuras.

El ensayo se realizó con una velocidad de remoción de  $160.3\text{mm}^3/\text{min}$  a una profundidad de  $0.005''$  con electrodo de cobre de  $\frac{3}{4}''$  de diámetro. Se midieron 50V y 20 Amp.

La tabla de la página 13 indican los parámetros del mecanizado.

En las siguientes micrografías se realizan mediciones de las diversas regiones localizadas por el erosionado.

#### FOTOGRAFIA #7 (100x)

Se notan 5 divisiones de la rejilla equivalentes a 5 micras, que es la zona total afectada por el mecanizado.

-La pieza se erosionó a  $320\text{mm}^3/\text{min}$  a una profundidad de  $0.025''$  con electrodo de grafito de  $\frac{1}{2}''$  en un tiempo de 0.24 sg.

-La medición de la máquina fue 50V y 26 Amp.

-La pieza se trabajó en estado de suministro y en la tabla 28 se amplían los datos de mecanización.

Posterior al erosionado se llevó a cabo revenido de la pieza a 400°C durante 60 minutos.

#### FOTOGRAFIA #8. (200x)

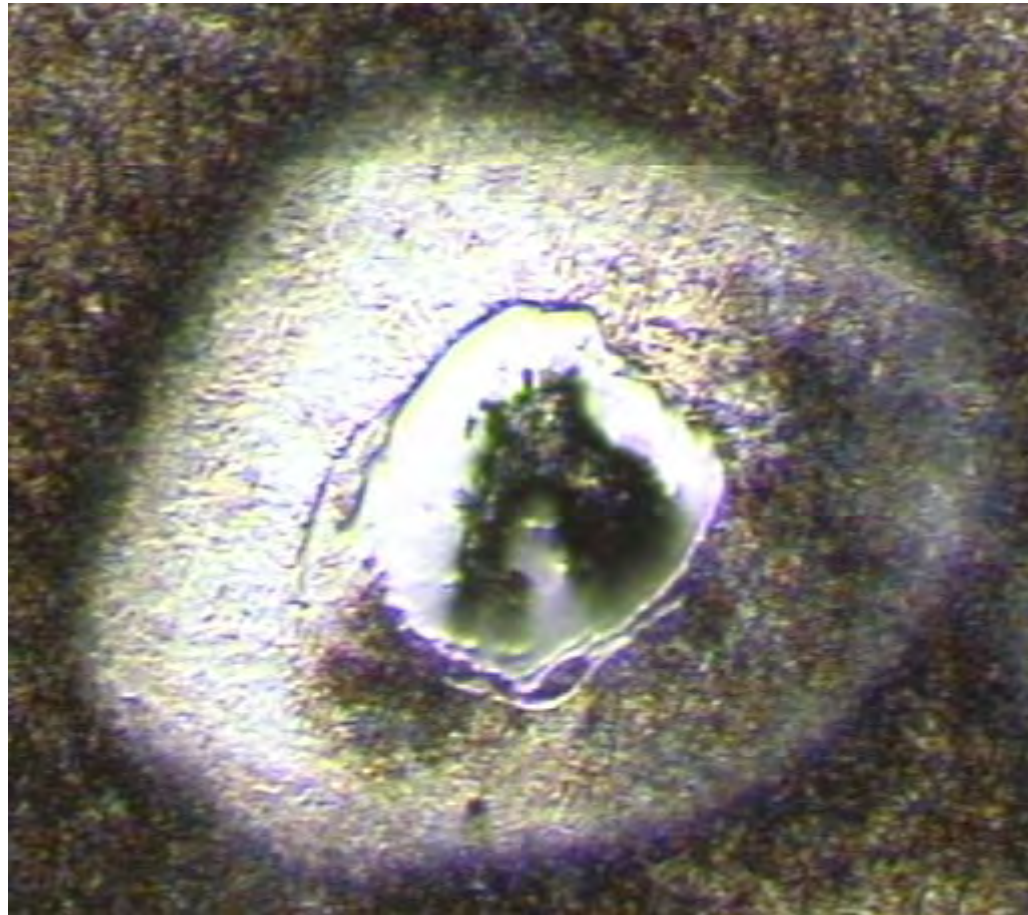
Esta nos muestra un proceso de pulido a 55 mm<sup>3</sup>/min en una pieza de suministro el material del electrodo es grafito de ½" con 0.005" de profundidad con un tiempo de 2.89 minutos.

Las tres primeras divisiones equivalen a 1.5 micras correspondientes a la capa blanca o fundida y luego 5 divisiones iguales a 2.5 micras que es la región afectada por el calor y cuyo microconstituyente es martensita revenida, después de un tratamiento de 1 hora a 400°C. Anexos de datos de las descargas eléctricas en la pág. 19.

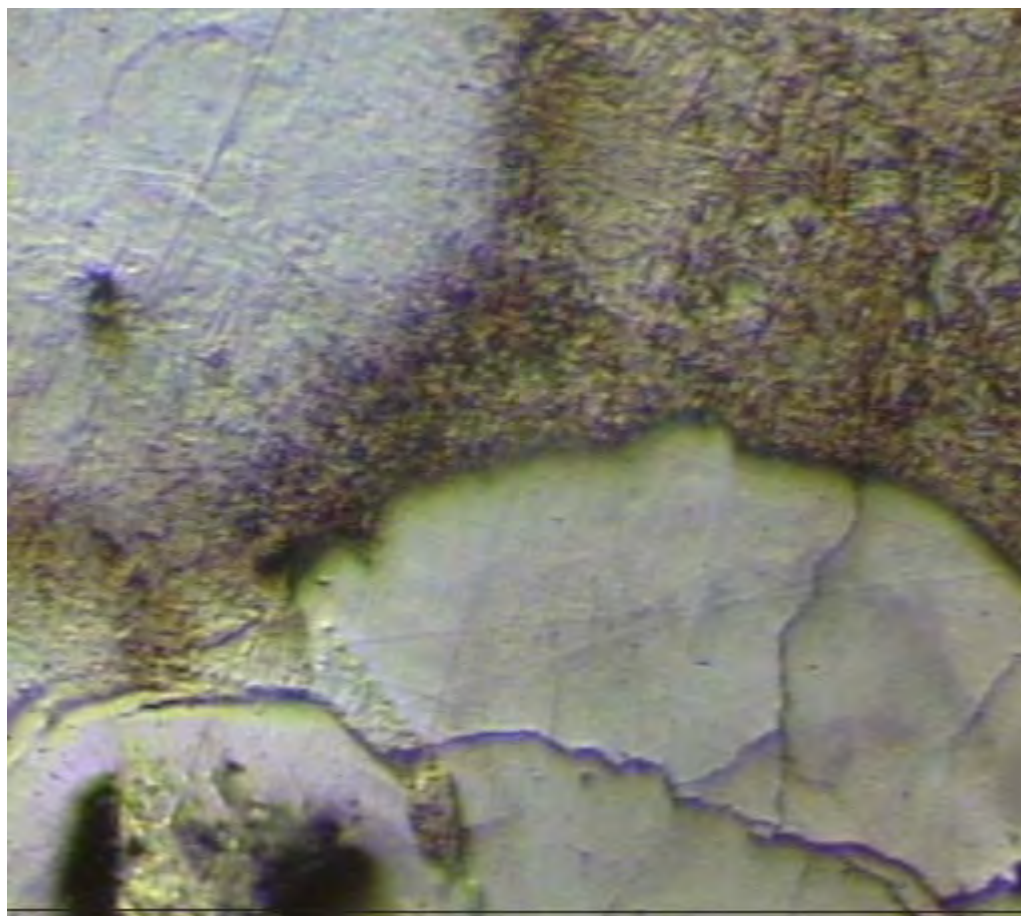
#### FOTOGRAFIA #9 (200 aumentos):

De la zona blanca se aprecia fisura que no alcanza a pasar a la región intermedia. Este defecto es perjudicial ya que esta pieza en trabajo al sufrir fatiga térmica propagará con facilidad esta fisura.

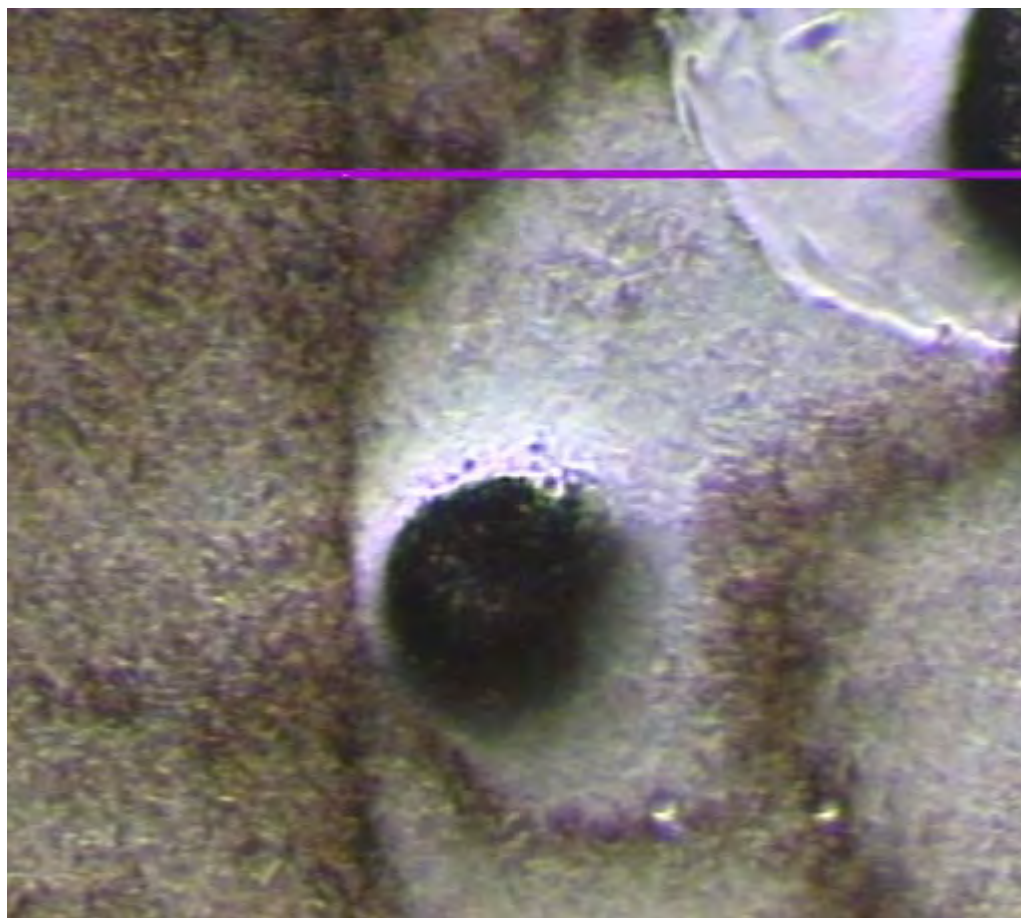
Se realizó mecanizado de desbaste a 440 mm<sup>3</sup>/min con electrodo de grafito de ½" y una profundidad de 0.035", en un tiempo de 0.24 min (Anexo pág. 28 de los datos del erosionado).



**MICROFOTOGRAFIA # 1**

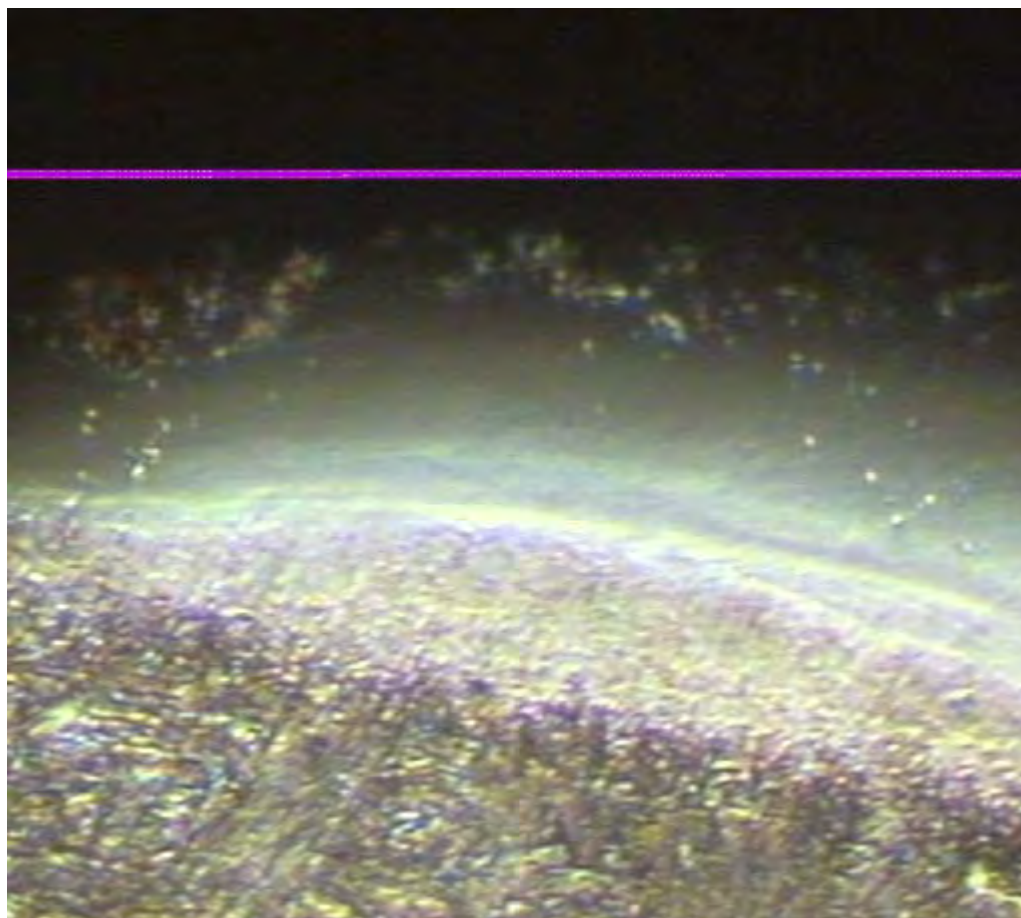


**MICROFOTOGRAFIA # 2**

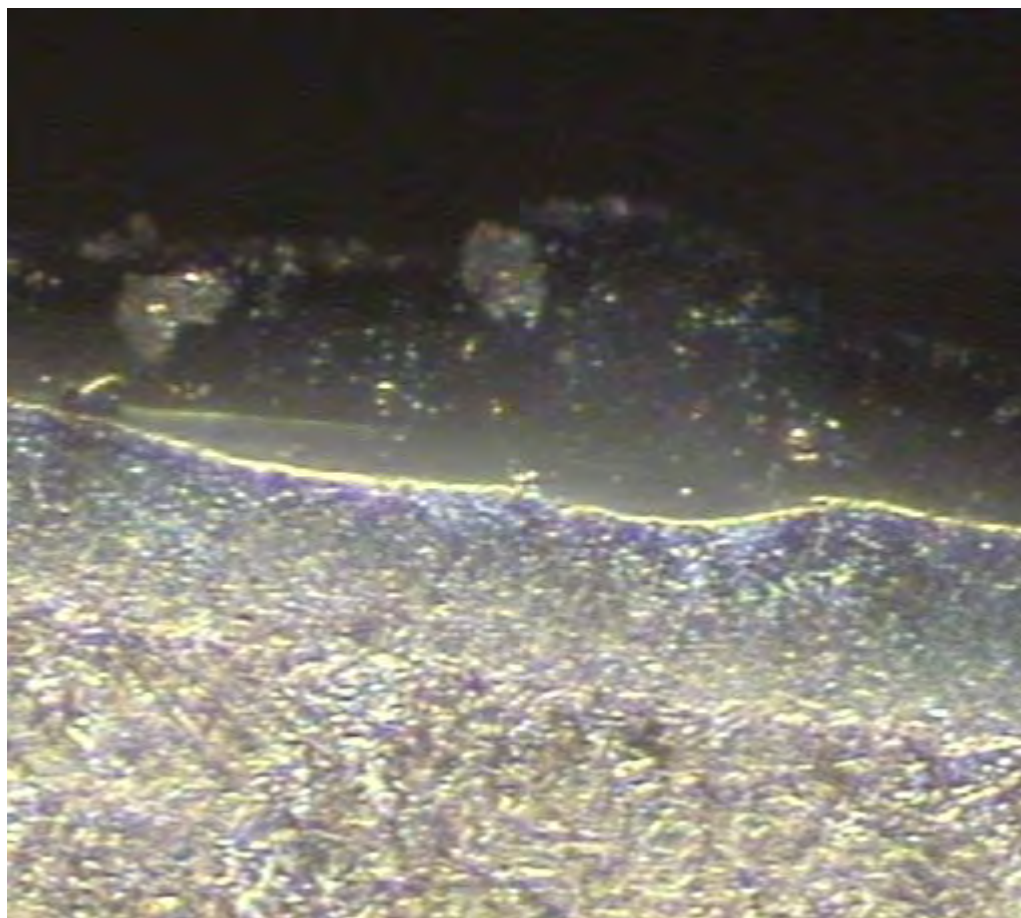


**MICROFOTOGRAFIA # 3**

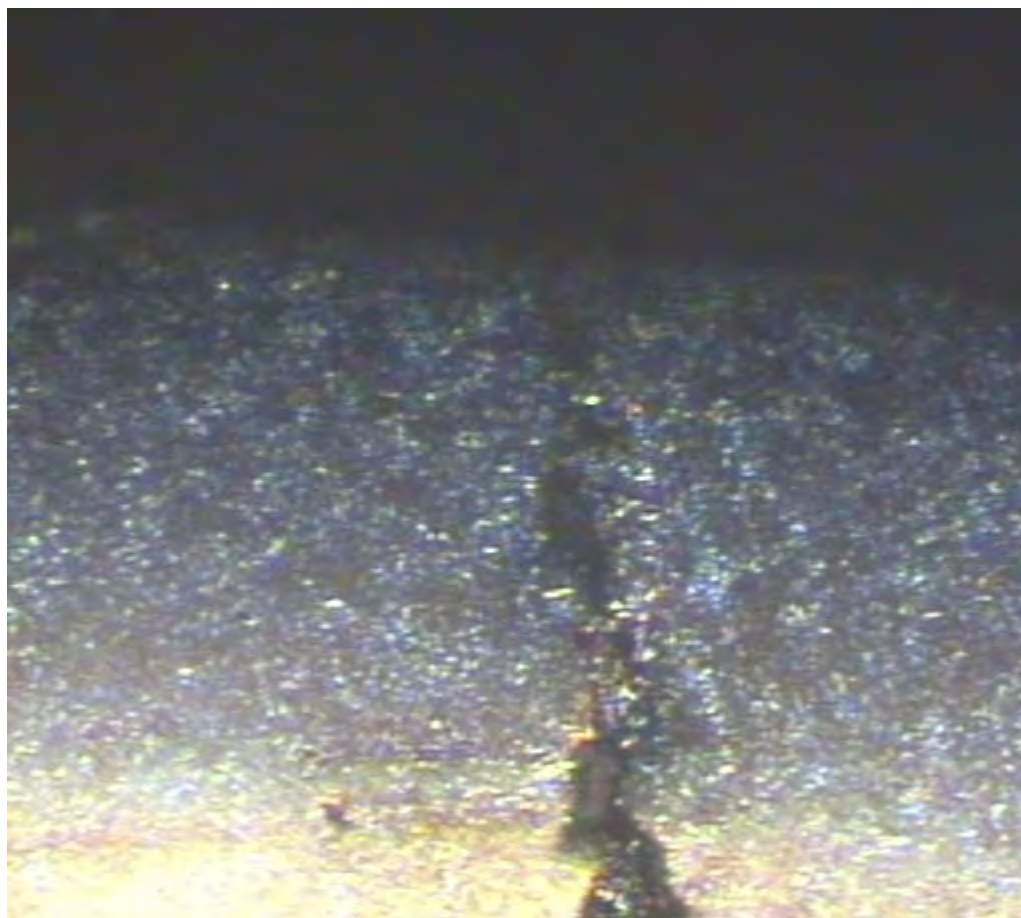




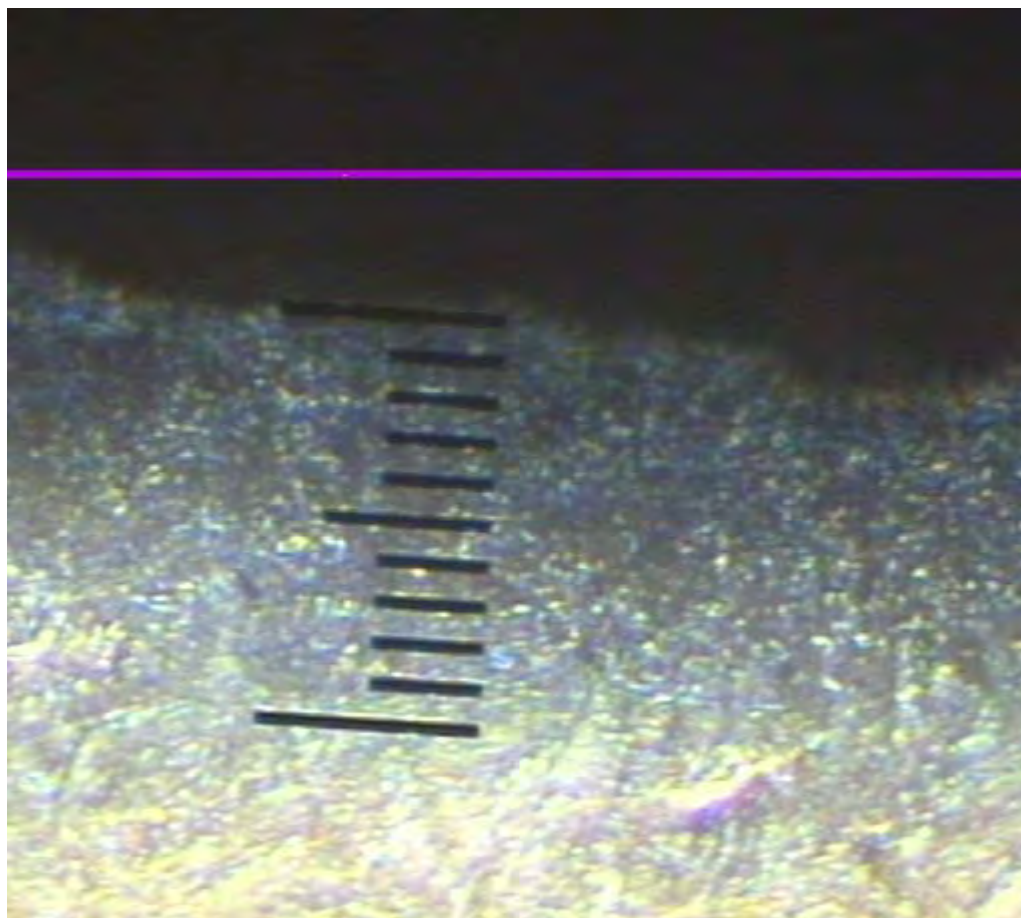
**MICROFOTOGRAFIA # 4**



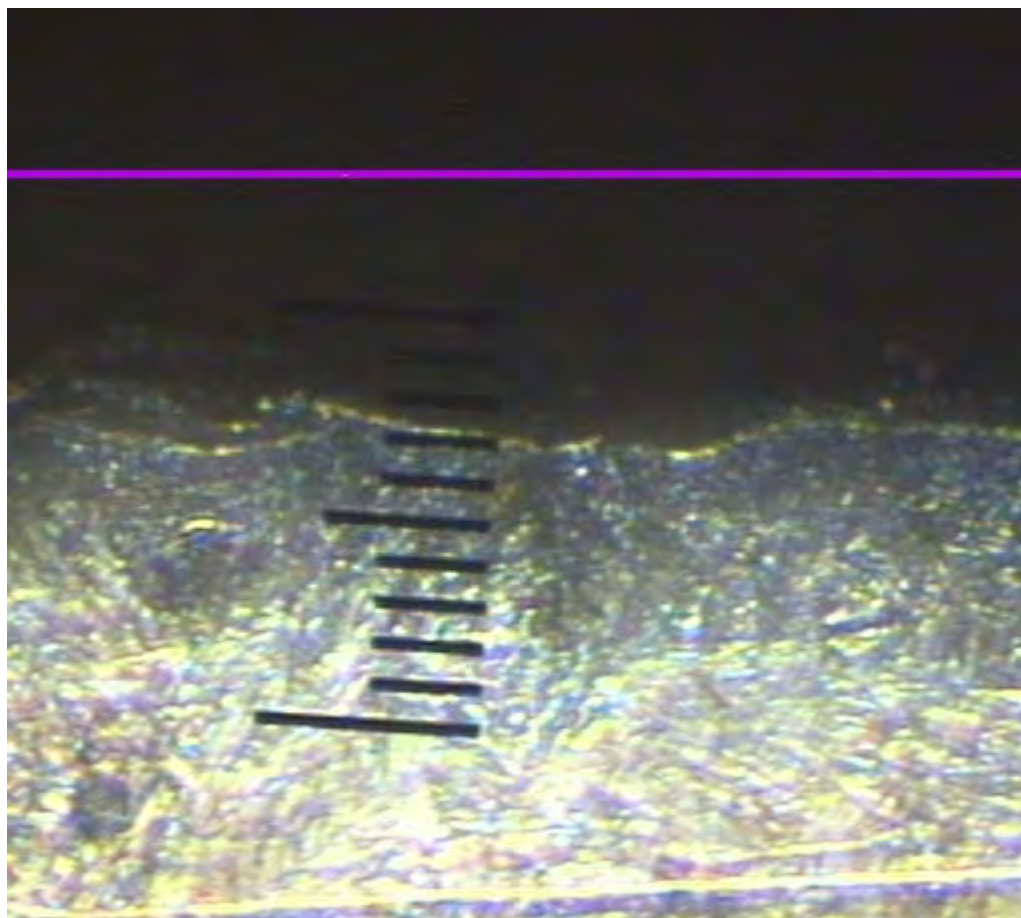
**MICROFOTOGRAFIA # 5**



**MICROFOTOGRAFIA # 6**

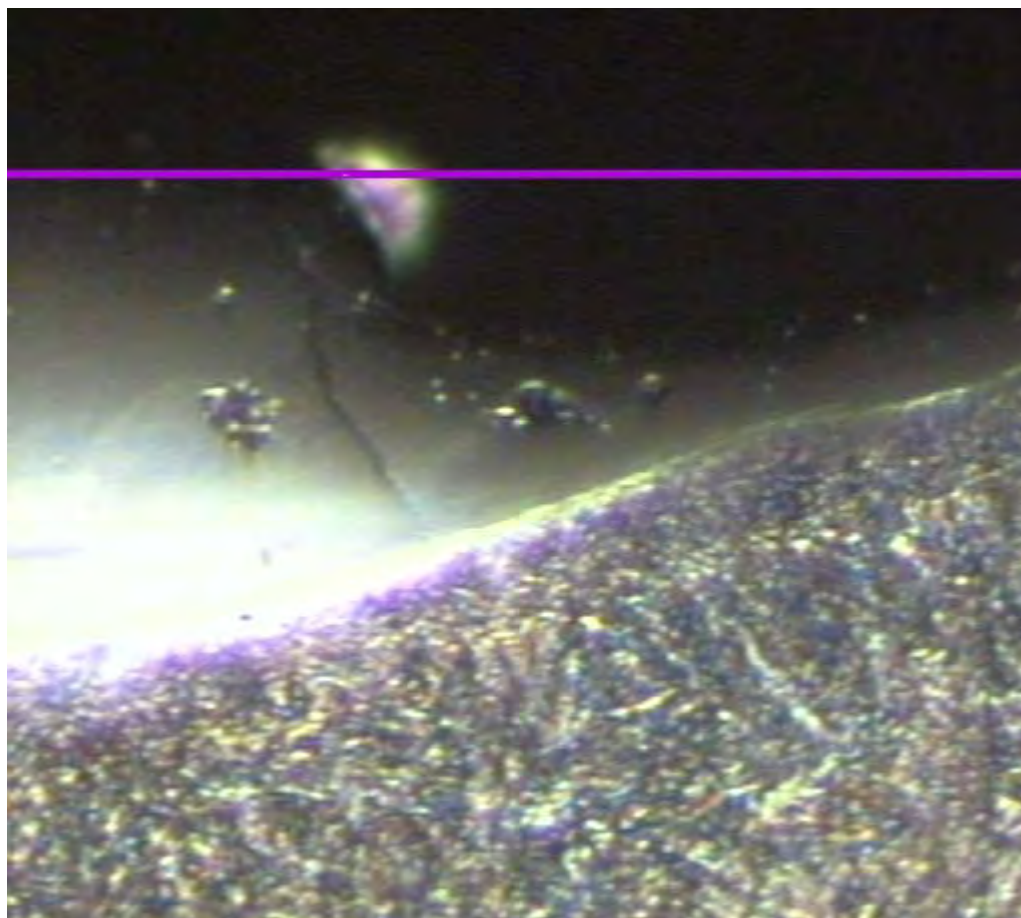


**MICROFOTOGRAFIA # 7**



**MICROFOTOGRAFIA # 8**





**MICROFOTOGRAFIA # 9**

## 8.5 PRUEBAS DE MICRODUREZA

Ya que los espesores de las capas del mecanizado por erosión son tan pequeños del orden de micras, no se podrán realizar mediciones exactas, ya que la huella que deja el indentador con la carga de 300 gramos sobrepasa las dimensiones de toda la región afectada por el calor. Por lo anterior se realiza la medición de microdureza en la zona o plano de la electroerosión y cercano a los cráteres, donde se pueden apreciar diferencias en las regiones donde se hacen las microdurezas.

La fotografía del cráter indica las regiones donde se realizaron las pruebas para dos probetas a diferentes tipos de mecanización (A,B,C) (Ver Anexo final fotografía).

### PRUEBA DE MICRODUREZA #1

Para una probeta con  $33\text{mm}^3/\text{min}$  con 15 milésimas de pulgada como profundidad del erosionado, el electrodo es de cobre y la pieza fue templada y revenida antes de la erosión a 46 HRC.

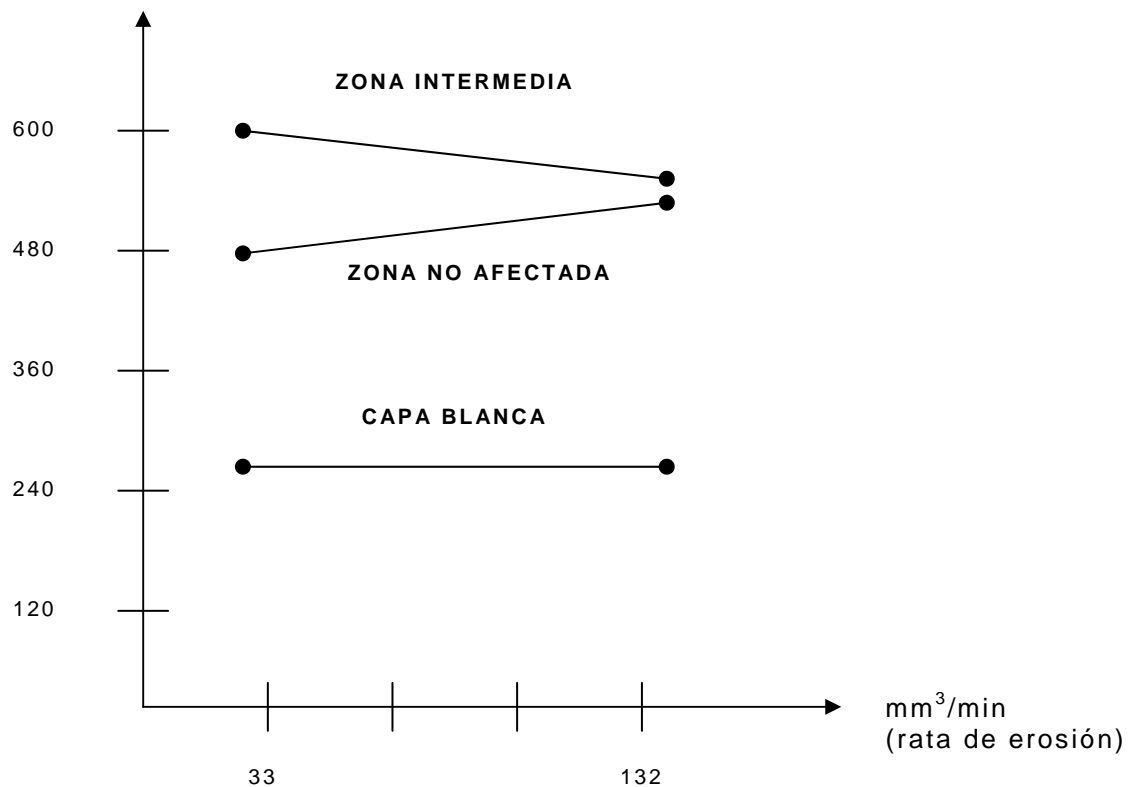
Zona (a)	Zona (b)	Zona (c)
460 HV(46.1 HRC)	270 HV(25.6 HRC)	593 HV(54.7 HRC)

## PRUEBA DE MICRODUREZA #2

Antes de mecanizar la pieza, la dureza de superficie 49 HRC y con  $143.1 \text{ mm}^3/\text{min}$  a 30 milésimas de pulgada de profundidad.

Zona (a)	Zona (b)	Zona (c)
500 HV(49 HRC)	256 HV(23 HRC)	508 HV(49.5 HRC)

Graficamos estos datos para compararlos:



Aquí se puede notar que la capa blanca es de poca dureza y la zona intermedia tiene mayor dureza que la zona no afectada por el mecanizado erosivo.



## PRUEBAS DE RUGOSIDAD

Estos ensayos se realizaron para tener información acertada de la rugosidad de las superficies obtenidas por electroerosión.

La prueba No. 1 corresponde a un mecanizado de pulido con  $14\text{mm}^3/\text{min}$  con un electrodo de cobre para una pieza de estado de suministro de 30 HRC.

La segunda medición de rugosidad se realizó para una pieza que se mecaniza a  $64\text{ mm}^3/\text{min}$ .

En ambos ensayos se notan las diferencias de las crestas debido a los pequeños cráteres dejados por la intensidad aplicada durante el proceso de mecanización.

## EXAMEN DE COMPOSICION QUIMICA DEL MATERIAL

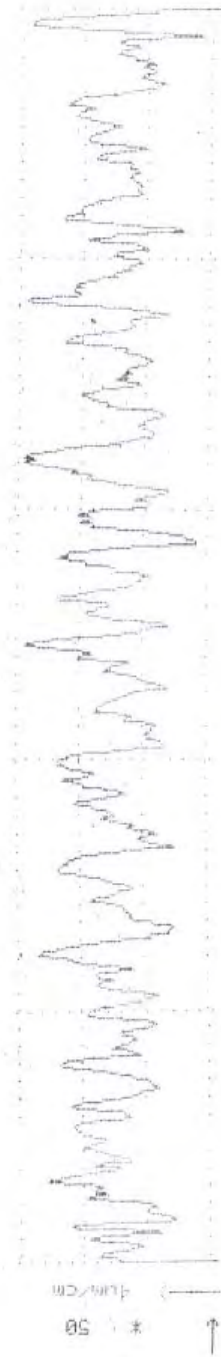
Ensayo importante ya que además de verificar la composición en % respectiva del acero en suministro, determinará en el diagrama hierro carbono las temperaturas de austenización para la realización del temple ordinario.

Los estándares del acero P-20 en AISI-SAE determinan el siguiente porcentaje: 0.80Mn, 0.35C, 0.50Si, 0.45Mo y 1.7Cr. por la tabla obtenida de la prueba de composición química el acero utilizado es un P-20 mejorado al cromo-níquel-molibdeno.

PRANIS  
RUG-03

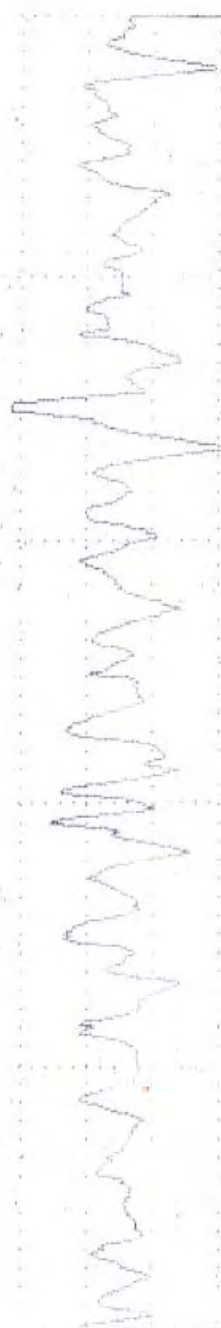
Date:  
Sample:

Ra= 1.79  $\mu$ m  
Rz= 10.32  $\mu$ m  
Rt= 11.88  $\mu$ m  
Rm= 11.46  $\mu$ m  
Lt= 4.8 mm  
 $\lambda$ C= 0.25 mm



PRUEBA No. 1 DE RUGOSIDAD

ACCOL

PRAZIS  
RUG-02Date:  
Sample:Ra= 3.48  $\mu$ m  
Rz= 22.67  $\mu$ m  
Rt= 39.24  $\mu$ m  
Rm= 39.24  $\mu$ m  
Lt= 4.8 mm  
Ac= 0.25 mm1  $\mu$ m/cm  
+ 50  
↑

PRUEBA No. 2 DE RUGOSIDAD

Servicio Nacional de Aprendizaje SENA  
Regional Valle del Cauca  
CENTRO COLOMBO ALEMAN CCA-ASTIN

# INFORME DE ENSAYO

Empresa : EMERSON ORTEGA BUITRAGO.  
Dirección : Calle 53 # 3-19  
Telefono : 4494589 NIT: 94.428.581  
Equipo : Espectrometro de Emisión atomica Probeta: Acero.

## Resultado del Análisis

STTOOL	CONC F:1		SN:		03/05/99 15:21:21		
Elem	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
Avge	.3658	.3908	1.431	.0251	.0095	1.910	.7381
#1	.3658	.3908	1.431	.0251	.0095	1.910	.7381
Elem	Mo	Cu	V	W	Co	Base	
Avge	.1997	.1400	.0166	.1585	.0383	94.577	
#1	.1997	.1400	.0166	.1585	.0383	94.577	

Observaciones :

Fecha de Expedición : Marzo 05 de 1999



Gilberto Bejarano Gaitán  
Ing. Metalúrgico CCA-ASTIN

## 9. CONCLUSIONES

El mecanizado erosivo es un proceso que afecta al material en su superficie en forma de tratamiento térmico localizado. Su principal ventaja radica en las complejas formas que se pueden obtener en piezas que sean aún muy endurecidas y los tipos de acabado que se obtienen con rugosidades mínimas de  $0.3\text{-}0.5\mu\text{m}$ . Además del ahorro en tiempo de trabajo cuando es comparado con medios de corte convencionales como torneado y fresado.

Será determinante al final del proceso el tratamiento térmico realizado a la pieza, porque dependiendo de los regímenes de mecanización se pueden presentar problemas superficiales peligrosos en la futura herramienta. Lo anterior es considerable ya que al ser menor la dureza de la matriz, menos sensible será el material al ofrecer resistencia durante la remoción provocada por las descargas eléctricas.

Dejar luego de un mecanizado considerable de desbaste un rango de  $0.5\text{-}1\text{ mm}$  para realizar un proceso de pulido con tasas de erosión de

0.5-5 mm<sup>3</sup>/min es aconsejable para que lo eliminen posibles problemas de superficie.

El acero utilizado P-20 mejorado al cromo-níquel-molibdeno, incrementará la resistencia a la corrosión, condiciones de altas temperaturas, retención o penetración proporcional de la dureza, los cuales son factores importantes para el buen desempeño de la herramienta durante el proceso de transformación de materiales plásticos.

Durante las pruebas de mecanizado, el electrodo que más sufrió desgaste volumétrico fue el elaborado con cobre, pero con el que se logró obtener una mejor superficie erosionada fue el electrodo de grafito. Actualmente en aplicaciones, la selección del material para electrodos es favorable hacia el cobre electrolítico y solo en casos de elevada remoción de material y acabado superficial importante es más utilizado el grafito.

## 10. RECOMENDACIONES

Es aconsejable después del erosionado realizar un proceso de pulido de acero para moldes, ya que la capa fundida blanca es débil de pocas condiciones mecánicas y con el efecto térmico de la transformación de materiales plásticos pueden anticiparse problemas superficiales en la herramienta de trabajo. De no poderse realizar lo anterior se puede llevar a cabo un revenido a 400°C para que la zona intermedia o retemplada alivie tensiones.

Anterior al mecanizado, el tratamiento térmico ideal para moldes sería el martempering de poca aplicación en nuestro país y que debido a sus características de realización no demanda un revenido adicional, obteniendo una superficie prácticamente sin tensiones residuales que facilitan un mejor mecanizado por electroerosión.

## BIBLIOGRAFÍA

BARREIRO APRAIZ, José. Tratamientos térmicos de los aceros. Editorial Dossatt 1974, p. 85, 116-119, 284-285.

Catálogos de Aceros para moldes plásticos y P.V.C., United Aceros Boehler S.A., 1998, p. 1-2.

CLERC, Gaston. El mecanizado por chispas o por electroerosión. Ediciones Cedel, 1966, p. 5, 9-11.

Manuales de tecnología de electroerosionadoras. Agie (Agiatron), Suiza, 1974, publicación 304, p. 5-11.

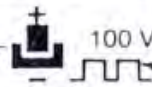
MOLERA SOLA, Pere. Electromecanizado: Electroerosión y mecanizado electroquímico. Marcombo Boixarey Editores (serie productiva), Barcelona, 1989, p. 23, 27, 29, 33.

Tutor de aceites Shell, módulo 9, aceites dieléctricos, 1998, p. 14-17.

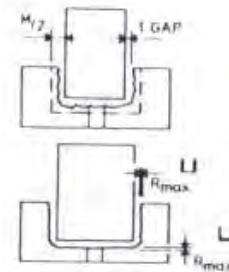


# **ANEXOS**

Kupfer	Rame
Copper	Cuivre
Stahl	Acciaio
Steel	Acier



IT	t(μs)	Ua	τ	R <sub>max</sub>	V <sub>w</sub>	ψ <sub>v</sub>	M	2GAP
1	75	40	24	16	6.3	0.2	0.2	0.09
2	100	35	24	23	2.8	0.8	0.25	0.10
1.5	75	35	24	18	17	1.0	0.2	0.10
3	75	35	25	24	5.3	2.1	0.25	0.12
2.5	100	35	25	25	36	0.8	0.25	0.12
5	150	30	25	38	10.9	1.8	0.35	0.15
4	150	30	25	35	78	0.8	0.3	0.14
6	200	30	25	47	14.0	1.5	0.4	0.18
6	300	30	25	54	14.0	0.9	0.5	0.19
9	300	30	25	60	23.0	1.6	0.55	0.21
8	500	30	25	66	18.0	0.3	0.6	0.23
12	500	30	25	67	28.0	0.6	0.7	0.26
10	500	30	25	78	22.0	0.5	0.7	0.25
15	500	30	25	93	4.05	0.9	0.8	0.28
13	500	30	25	84	3.30	0.7	0.8	0.27
18	500	30	25	98	4.80	1	0.9	0.30
30	750	30	25	140	7.50	1.0	1.1	0.37
36	750	30	25	168	8.10	1.1	1.2	0.42



Low wear  
Standard parameters



IT	t(μs)	Ua <sub>min</sub>	τ <sub>max</sub>	V <sub>w</sub>	ψ <sub>v</sub>	2GAP
1	10	4.5	24	5	5	0.06
1	15	4.5	24	7.5	4	0.06
2	10	4.5	24	16	15	0.06
1	20	4.5	24	8.5	3	0.07
2	15	4.5	24	2.3	11	0.07
1	30	4.5	24	9	2.3	0.07
2	20	4.5	24	29	7	0.07
1	75	40	24	6.3	0.2	0.09
2	30	40	25	17	4.5	0.09
2	50	40	24	34	1.6	0.09
3	40	25	42	7	0.09	
2	75	40	24	30	1.2	0.10
3	50	35	25	4.6	3	0.10
2	100	40	24	28	0.8	0.11
4	50	35	25	7.5	6	0.11
2	150	40	24	21	0.2	0.12
4	75	35	25	26	3.7	0.12
2	200	40	24	18	0.2	0.13
4	100	30	25	28	1.3	0.13
4	150	30	25	78	0.8	0.14
6	100	30	25	14.0	4	0.14
4	200	35	25	26	0.3	0.16
6	150	30	25	14.0	2.8	0.16
8	150	30	25	190	5.5	0.17
8	200	30	25	190	2	0.18

IT Current (Switches IT, IP, IR)  
1 IT ≈ 3A

tp Pulse duration (Switch t μs)

V<sub>w</sub> Rate of erosion (mm<sup>3</sup>/min)

ψ<sub>v</sub> Volumetric wear (%)

R<sub>max</sub> Maximum roughness depth (μm)

Ra Arithmetical roughness average (μm)

F<sub>p</sub> Surface to erode (cm<sup>2</sup>)

GAP Spark gap per side (mm)

M Minimum undersize (mm)

Ua Working voltage (V)

ψ<sub>M</sub> The lateral surface wear

▽ Roughing

▽▽ Semi-Finishing

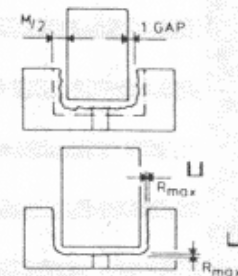
▽▽▽ Finishing

▽▽▽▽ Super-Finishing

Grafit	Grafite
Graphite	Graphite
Stahl	Acciaio
Steel	Acier

**AGIE**

	IT	t(μs)	Ua	τ	R <sub>max</sub>	V <sub>w</sub>	ψ <sub>v</sub>	M	2GAP
▽	4	100	35	22	36	62	1,7	0,3	0,13
	6	150	35	22	50	110	1	0,4	0,16
	10	150	35	23	63	222	0,2	0,5	0,18
	18	200	33	23	82	480	0,1	0,7	0,27
	24	200	33	23	92	670	0,1	0,8	0,29
	36	300	33	23	130	1600	0,6	1	0,4
▽▽	24	200	33	23	92	670	0,1	0,8	0,29
	30	300	33	23	118	1100	0,4	1	0,36
	36	300	33	23	130	1600	0,6	1	0,4
▽▽▽	48	500	33	23	190	1900	0,6	1,3	0,51
	60	500	33	23	225	2450	0,7	1,4	0,56
▽▽▽▽	72	500	33	23	260	3000	0,7	1,6	0,60
▽▽▽▽▽	84	750	33	23	305	3325	0,7	1,8	0,65



	IT	t(μs)	Ua	τ	V <sub>w</sub>	ψ <sub>v</sub>	2GAP
▽	2	7,5	40	20	6	32	0,06
	2	10	40	22	10	30	0,07
▽▽	3	20	35	22	32	12	0,08
	3	30	35	22	36	10	0,09
▽▽▽	4	30	35	22	61	8	0,10
	5	30	35	22	81	8	0,10
▽▽▽▽	7	30	35	22	125	7	0,10
	5	50	35	22	94	4	0,11
▽▽▽▽▽	9	30	35	22	163	7	0,11
	5	100	35	22	91	1,6	0,14
▽▽▽▽▽▽	7	75	35	22	151	2,8	0,14
	9	100	35	22	207	1,3	0,16

Grafit	Grafite
Graphite	Graphite
Stahl	Acciaio
Steel	Acier



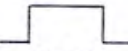

	IT	t(μs)	Ua	τ	V <sub>w</sub>	ψ <sub>v</sub>	2GAP
▽	2	7,5	40	20	6	32	0,06
	2	10	40	22	10	30	0,07
▽▽	3	20	35	22	32	12	0,08
	3	30	35	22	36	10	0,09
▽▽▽	4	30	35	22	61	8	0,10
	5	30	35	22	81	8	0,10
▽▽▽▽	7	30	35	22	125	7	0,10
	5	50	35	22	94	4	0,11
▽▽▽▽▽	9	30	35	22	163	7	0,11
	5	100	35	22	91	1,6	0,14
▽▽▽▽▽▽	7	75	35	22	151	2,8	0,14
	9	100	35	22	207	1,3	0,16

## Low wear Standard parameters

- IT Current (Switches IT, IP, IR)  
1 IT ≈ 3A
- tp Pulse duration (Switch t μs)
- V<sub>w</sub> Rate of erosion (mm<sup>3</sup>/min)
- ψ<sub>v</sub> Volumetric wear (%)
- R<sub>max</sub> Maximum roughness depth (μm)
- R<sub>a</sub> Arithmetical roughness average (μm)
- F<sub>P</sub> Surface to erode (cm<sup>2</sup>)
- GAP Spark gap per side (mm)
- M Minimum undersize (mm)
- Ua Working voltage (V)
- ψ<sub>M</sub> The lateral surface wear
- ▽ Roughing
- ▽▽ Semi-Finishing
- ▽▽▽ Finishing
- ▽▽▽▽ Super-Finishing

50A # TECHNICAL DATA OF DISCHARGING #

ELECTRODE : COPPER \*\* COPPER +  
 POLARITY : POSITIVE STEEL -  
 WORKPIECE : S45C STEEL  
 CURRENT : SEE BELOW CURRENT COLUMN \*\* GAP MEASURED TWO SIDES.  
 DIAMETER :  $\phi 16$  mm  
 DEPTH : 2 m/m DIELECTRIC FLUID : MENTOR (ESSO-STANDARD)

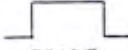
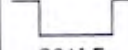
ON-TIME SCALE 	OFF-TIME SCALE 	MAIN CURRENT SCALE	MICRO CURRENT SCALE	SURFACE FINISHES (CH)	2 X GAP (IN mm.)	ELECTRODE WEAR %	CUTTING SPEED mm <sup>3</sup> /min
1	3	6	3	30	0.03	30	4.5
2	3	6	3	31	0.05	25	10
3	3	6	3	32	0.07	20	18
4	3	6	3	33	0.09	14	26
5	3	6	3	34	0.12	9	28
6	4	6	3	35	0.13	5	30
7	4	6	3	36	0.15	3	33
8	5	6	3	37	0.18	1.5	41
9	5	6	3	38	0.19	< 1	49
10	6	6	3	39	0.20	< 1	58
11	6	6	3	40	0.22	< 1	56
12							



## 50A # TECHNICAL DATA OF DISCHARGING #

ELECTRODE : COPPER +  
 POLARITY : POSITIVE +  
 WORKPIECE : S45C STEEL  
 CURRENT : SEE BELOW CURRENT COLUMN  
 DIAMETER :  $\phi 16$  mm  
 DEPTH : 10 mm

\*\* COPPER +  
 STEEL -  
 \*\* GAP MEASURED TWO SIDES.  
 DIELECTRIC FLUID : MENTOR (ESSO-STANDARD)

ON-TIME SCALE 	OFF-TIME SCALE 	MAIN CURRENT SCALE	MICRO CURRENT SCALE	SURFACE FINISHES (CH)	2 × GAP (IN mm.)	ELECTRODE WEAR %	CUTTING SPEED mm <sup>3</sup> /min
1	4	10	3	34	0.07	40	17.0
2	4	10	3	35	0.09	33	35.1
3	4	10	3	36	0.11	28	53.2
4	5	10	3	37	0.13	22	71.3
5	5	10	3	38	0.15	15	94.2
6	6	10	3	39	0.17	9	117.1
7	6	10	3	40	0.19	5	140.0
8	6	10	3	41	0.21	2.2	148.8
9	7	10	3	42	0.23	1.2	157.5
10	7	10	3	43	0.25	< 1	160.3
11	7	10	3	44	0.27	< 1	143.1
12	7	10	3	45	0.28	< 1	114.5

## 50A # TECHNICAL DATA OF DISCHARGING #

ELECTRODE : COPPER  
 POLARITY : POSITIVE +  
 WORKPIECE : S45C STEEL  
 CURRENT : SEE BELOW CURRENT COLUMN  
 DIAMETER :  $\phi 16$  mm  
 DEPTH : 10 mm

\*\* COPPER +  
 STEEL -  
 \*\* GAP MEASURED TWO SIDES.  
 DIELECTRIC FLUID : MENTOR (ESSO-STANDARD)

ON-TIME SCALE	OFF-TIME SCALE	MAIN CURRENT SCALE	MICRO CURRENT SCALE	SURFACE FINISHES (CH)	2 X GAP (IN mm.)	ELECTRODE WEAR %	CUTTING SPEED mm <sup>3</sup> /min
1	4	11	3	35	0.12	50	21
2	4	11	3	36	0.14	45	44.5
3	4	11	3	37	0.16	40	79.7
4	5	11	3	38	0.18	35	114.8
5	5	11	3	39	0.20	30	126.9
6	5	11	3	40	0.24	25	136.8
7	6	11	3	41	0.26	20	150.4
8	6	11	3	42	0.30	15	173.3
9	6	11	3	43	0.34	8	196.4
10	7	11	3	44	0.38	4	217.6
11	7	11	3	45	0.41	2	223.4
12	7	11	3	46	0.48	1	202.6

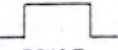
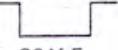
## 50A # TECHNICAL DATA OF DISCHARGING #

ELECTRODE : GRAPHITE +  
 POLARITY : POSITIVE +  
 WORKPIECE : S45C STEEL  
 CURRENT : SEE BELOW CURRENT COLUMN  
 DIAMETER :  $\phi 16$  mm  
 DEPTH : 2 mm

\*\* GRAPHITE +  
 STEEL -

\*\* GAP MEASURED TWO SIDES.

DIELECTRIC FLUID : MENTOR (ESSO-STANDARD)

ON-TIME SCALE 	OFF-TIME SCALE 	MAIN CURRENT SCALE	MICRO CURRENT SCALE	SURFACE FINISHES (CH)	2 X GAP (IN mm.)	ELECTRODE WEAR %	CUTTING SPEED mm <sup>3</sup> /min
1	2	2	3	27	0.02	20	0.5
2	2	2	3	28	0.03	15	1.5
3	2	2	3	29	0.04	10	2.3
4	3	2	3	30	0.05	6	2.5
5	3	2	3	31	0.06	3	4.0
6	3	2	3	32	0.08	2	5.0
7	4	2	3	33	0.10	< 1	5.5
8	4	2	3	34	0.12	< 1	4.0
9	5	2	3	35	0.14	< 1	2.0
10							
11							
12							

## 50A # TECHNICAL DATA OF DISCHARGING #

ELECTRODE : GRAPHITE +  
 POLARITY : POSITIVE +  
 WORKPIECE : S45C STEEL  
 CURRENT : SEE BELOW CURRENT COLUMN  
 DIAMETER :  $\phi 16$  mm  
 DEPTH : 10 mm

\*\* GRAPHITE +  
 STEEL -

\*\* GAP MEASURED TWO SIDES.

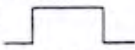

DIELECTRIC FLUID : MENTOR (ESSO-STANDARD)

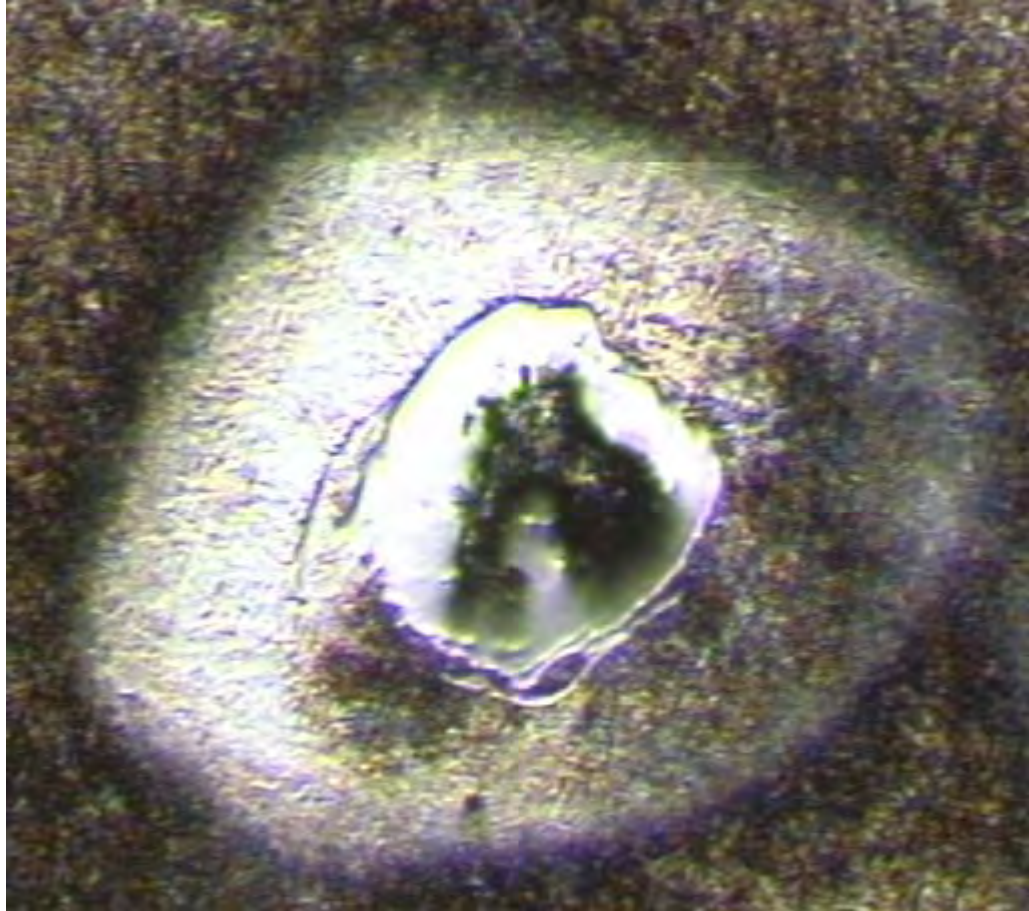
ON-TIME SCALE	OFF-TIME SCALE	MAIN CURRENT SCALE	MICRO CURRENT SCALE	SURFACE FINISHES (CH)	2 × GAP (IN mm.)	ELECTRODE WEAR %	CUTTING SPEED mm <sup>3</sup> /min
1	4	10	3	35	0.08	25	32
2	4	10	3	36	0.10	22	56
3	4	10	3	37	0.12	18	96
4	4	10	3	38	0.14	16	160
5	4	10	3	39	0.16	14	280
6	5	10	3	40	0.18	10	352
7	5	10	3	41	0.20	4	320
8	6	10	3	42	0.22	2	288
9	6	10	3	43	0.24	1	256
10	7	10	3	44	0.26	< 1	200
11	7	10	3	45	0.28	< 1	160
12							



## 50A # TECHNICAL DATA OF DISCHARGING #

ELECTRODE : GRAPHITE + \*\* GRAPHITE +  
 POLARITY : POSITIVE + STEEL -  
 WORKPIECE : S45C STEEL  
 CURRENT : SEE BELOW CURRENT COLUMN \*\* GAP MEASURED TWO SIDES.  
 DIAMETER :  $\phi 16$  mm  
 DEPTH : 10 mm DIELECTRIC FLUID : MENTOR (ESSO-STANDARD)

ON-TIME  SCALE	OFF-TIME  SCALE	MAIN CURRENT SCALE	MICRO CURRENT SCALE	SURFACE FINISHES (CH)	2 × GAP (IN mm.)	ELECTRODE WEAR %	CUTTING SPEED mm <sup>3</sup> /min
1	4	11	3	37	0.13	25	40
2	4	11	3	38	0.15	22	80
3	4	11	3	39	0.17	20	120
4	4	11	3	40	0.19	17	200
5	4	11	3	41	0.21	15	320
6	5	11	3	42	0.25	14	400
7	5	11	3	43	0.27	13	440
8	6	11	3	44	0.31	12	336
9	6	11	3	45	0.35	8	320
10	7	11	3	46	0.40	8	296
11	7	11	3	47	0.43	8	224
12	7	11	3	48	0.50	8	160



**MUESTRA DE ZONAS DONDE SE REALIZARON PRUEBAS DE  
MICRODUREZA, REFERIDO A LA MICROFOTOGRAFIA 1**

